

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Problematika vysokého kotvení v hornictví
High Anchoring Problems in the Mining

Student: Jindřich Skopal
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Jindřich Skopal**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Problematika vysokého kotvení v hornictví**
High Anchoring Problems in the Mining

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky kotvení důlních děl
2. Aplikace tzv. "vysokého kotvení" v porubních chodbách určených ke dvojímu využití
3. Technologie pramencových kotev a problematika jejich spolupráce s krátkými tyčovými svorníky
4. Návrh parametrů "vysokého" kotvení pro dvojí využití chodeb, návrh konstrukce pro případ z praxe.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Časopis Tunel - čtvrtletník ,vydává CZTA
2. Časopis Budownictwo gornicze i tunelowe - čtvrtletník ,vydává nakladatelství WG Katowice
3. Aldorf,J. *Mechanika podzemních konstrukcí* , ES VŠB-TU 1999
4. Internetové stránky týkající se kotvení

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Josef Aldorf, DrSc.**

Datum zadání: 31.10.2011

Datum odevzdání: 30.04.2012

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Darja Kubečková Skulinová, Ph.D.
děkanka fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

Problematika vyztužování důlních děl je dnes velmi časté téma. V Ostravsko - karvinském revíru se při vyztužování začala vracet a používat svorníková výztuž. Zkušenosti se svorníkovou výztuží ovšem nebyly nijak velké. Samotný přínos svorníků či vysokého kotvení, se dostavil i přes složité podmínky Ostravsko – karvinského revíru. Hlavní částí práce je obeznámení se svorníkovou výztuží a samotným vysokým kotvením. Pozornost kladu na vysvětlení principu spolupůsobení vysokého kotvení a obloukové výztuže. V poslední kapitole se nachází zjednodušený návrh a výpočet vysokého kotvení s obloukovou výztuží pro parametry místních černouhelných dolů.

Abstract

The issues connected with the reinforcement of mine guns is a topic very often discussed nowadays. In the Ostrava-Karviná district, the bolted reinforcement started to be used with the reinforcement. However, the experience with bolted reinforcement was not great. The benefits of bolts or high anchoring itself came eventually, even in the complex conditions of the Ostrava-Karviná district. The main part of this thesis is to be acquainted with bolted reinforcement and high anchoring itself. I also focus on the explanation of the principle of the joint influence over high anchoring and arched reinforcement. In the last chapter, there is a simplified draft and calculation of high anchoring with arched reinforcement for the parameters of the local coal mines.

Obsah bakalářské práce

Seznam použitých zkratk	1
1. Úvod	2
2. Problematika kotvení důlních děl	3
2.1. Funkce výztuže a svorníků	3
2.2. Princip chování svorníků	4
2.3. Přenos zatížení	6
2.4. Udržení stavu vodorovného napětí ve stropu	9
3. Aplikace tzv. „vysokého kotvení“ v prubních chodbách určených ke dvojímu využití	12
3.1. Vysoké kotvení	12
3.2. Princip a návrh vysokého kotvení	12
3.3. Porubní chodby určené ke dvojímu využití	18
3.4. Vysoké kotvení v porubních chodbách určených ke dvojímu využití	19
4. Technologie pramencových kotev a problematika jejich spolupráce s krátkými tyčovými svorníky	22
4.1. Spolupráce krátkých tyčových svorníků a dlouhých pramencových kotev	22
4.2. Návrh pramencových kotev a krátkých tyčových svorníků	23
5. Návrh parametrů „vysokého kotvení“ pro dvojí využití chodeb, návrh konstrukce pro případ z praxe	26
5.1. Návrh a výpočet obloukové výztuže a „vysokého kotvení“	26
6. Závěr	45
7. Seznam použitých zdrojů	46
8. Seznam obrázků	47
9. Seznam tabulek	49

Seznam použitých zkratk:

A	šířka světlého profilu důlního díla [m]	M_z	mocnost závalové oblasti [m]
a	poloměr výztužného oblouku [m]	N_i	normálová síla v i - tém prutu [kN]
A_p	plocha výztuže [m ²]	q_n	normové zatížení [MPa]
b	šířka výztuže [m]	q_{xi}	horizontální spojité zatížení [kN/m]
C	je empirický součinitel popisující soudržnost horniny po porušení [-]	q_{zi}	vertikální spojité zatížení [kN/m]
d	průměr drátu [mm]	P_x	horizontální síla [kN]
D	průměr pramence [mm]	P_z	vertikální síla [kN]
E	modul pružnosti oceli [MPa]	R_e	mez kluzu obloukové výztuže [MPa]
E_b	modul pružnosti obklopující prostředí [MPa]	R_n	mez pevnosti obloukové výztuže [MPa]
H	je skutečná geometrická hloubka díla pod povrchem [m]	R_{nk}	mez pevnosti kotvy [MPa]
h	výška díla [m]	W_x	modul průřezu [m ³]
h_{zi}	proměnná výška vertikálního zatížení [m]	σ_{Di}	je pevnost v tlaku i-té vrstvy [MPa]
h_{zxi}	proměnná výška horizontálního zatížení [m]	σ_i	napětí obloukové výztuže prutu v i- tém prutu [MPa]
H_{ef}	Efektivní hloubka pod povrchem [m]	σ_r	redukováná pevnost hornin [MPa]
I_x	Moment setrvačnosti [m ⁴]	σ_t	je pevnost v tahu hornin [MPa]
k	koeficient nakypření nadložních hornin [-]	β	je úhel dle Protodjakonovy teorie [°]
k_1	je součinitel ovlivnění díla dobývacími pracemi [-]	β_i	je součinitel vlivu vrstevnatosti [-]
k_2	je součinitel vlivu úklonu vrstev [-]	γ	objemová tíha horniny [kN/m ³]
k_p	součinitel pasivního odporu	φ	úhel vnitřního tření [°]
M_d	dobývaná mocnost sloje [m]	μ_b	poissonovo číslo obklopujícího prostředí [-]
M_{ci}	je mocnost i-té vrstvy [m]		
M_i	moment v i - tém prutu [kNm]		

1. Úvod

Vysoké kotvení v hornictví je u nás poměrně nová a moderní záležitost. Tento trend kotvení k nám přišel ze sousedního Polska, kde již byl hojně využíván. Kořeny této metody kotvení ovšem hledíme za oceánem ve Spojených státech amerických a Austrálii. Vysoké kotvení u nás využíváme pouze v černouhelných dolech Ostravsko - karvinského revíru.

Technologie vysokého kotvení nám přináší spoustu nových možností, ale hlavně zvýšení zabezpečení samotného důlního díla. V dnešní době je na prvním místě bezpečnost a zdraví. Vzhledem k tomu, že dnes se pohybujeme v hloubkách okolo 1000 metrů, narůstají nároky na samotné zabezpečení důlního díla. Metoda vysokého kotvení je založena na principu zakotvení prvků výztuže do pevných poloh ve vyšším nadloží. Samotné kotvení provádíme pomocí dlouhých kotev, jejichž délka několikanásobně překračuje výšku důlního díla. S přihlédnutím k tomu faktu, máme kotvy lanové s možností stočení a také kotvy sklolaminátové, které jsou ohebné. Využitím této technologie se zabezpečují například chodby dvojího využití, kterými se dále budu zabývat.

Musíme si, ale uvědomit, že i po aplikaci vysokého kotvení může dojít k samotné deformaci důlního díla. Náš cíl je tyto deformace zmenšit či minimalizovat. Samotné kotvení je finančně náročnější, ale vzhledem k zabezpečení a zvýšení bezpečnosti na pracovišti se to vyrovná.

2. Problematika kotvení důlních děl

Kvalitním zajištěním důlního díla a jeho dlouhodobé funkce je použití adekvátní výztuže. Nároky na vyztužení důlních děl se s narůstající hloubkou zvyšují, proto dnes používáme výztuže tzv. kombinované, kdy používáme například ocelovou výztuž se svorníky.

2.1. Funkce výztuže a svorníků

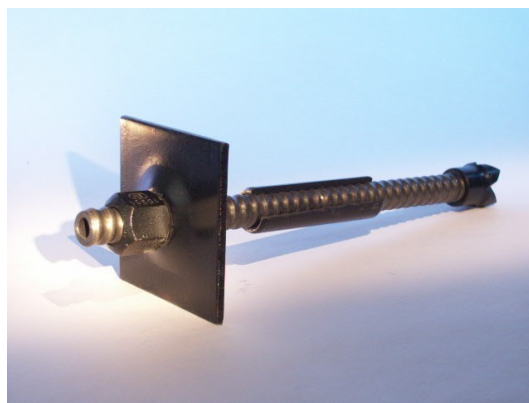
Po vyražení podzemního díla se okolní vrstvy v málo pevném horninovém masivu stávají nestabilní. V této chvíli nastává situace, kdy nestabilní vrstvy různými způsoby vyztužujeme. „Hlavním účelem výztuže je aktivace, uchování a zvýšení vnitřního napětí (tahového a smykového) vrstev a udržení jejich nosné funkce.“ [1]

Výztuž nám zajišťuje odpor povrchu výlomu vůči horninovému masivu. Za výztuž považujeme dřevěné stojky, ocelové oblouky, dřevěné hráně, betonové pažiny, stříkaný beton atd. Všechny tyto prvky jsou součástí tzv. pasivního způsobu vyztužování, jelikož jejich aktivace vyztužovacího odporu je podmíněna pohybem horninového masivu. Díla takto vyztužená vyžadují zvětšený výlom, aby zde mohla být instalovaná požadovaná výztuž a přitom zachovaná velikost profilu díla. Jednou z dalších nevýhod pasivní výztuže je velká hmotnost vyztužovacích prvků a tím zhoršená manipulace.

Aktivním způsobem vyztužování rozumíme tehdy, kdy upravují vnitřní chování horninového masivu instalací stavebních prvků (svorníků) uvnitř masivu. Zde patří bodově kotvené svorníky, svorníky lepené po celé délce, svorníky předpínané atd. „Tyto aktivní zesilující prvky vytvářejí reakci k pohybu horninového masivu, vyvíjejí omezující sílu a přenášejí tuto sílu zpět do horninového masivu.“ [1] Tato síla působí proti horninovému napětí a vytvoří rovnovážný stav. Svorníky mají dlouholetou tradici a hluboké kořeny už od primitivních indických kmenů. K největšímu vývoji došlo po druhé světové válce, kdy se využití svorníků průmyslově rozrostlo.



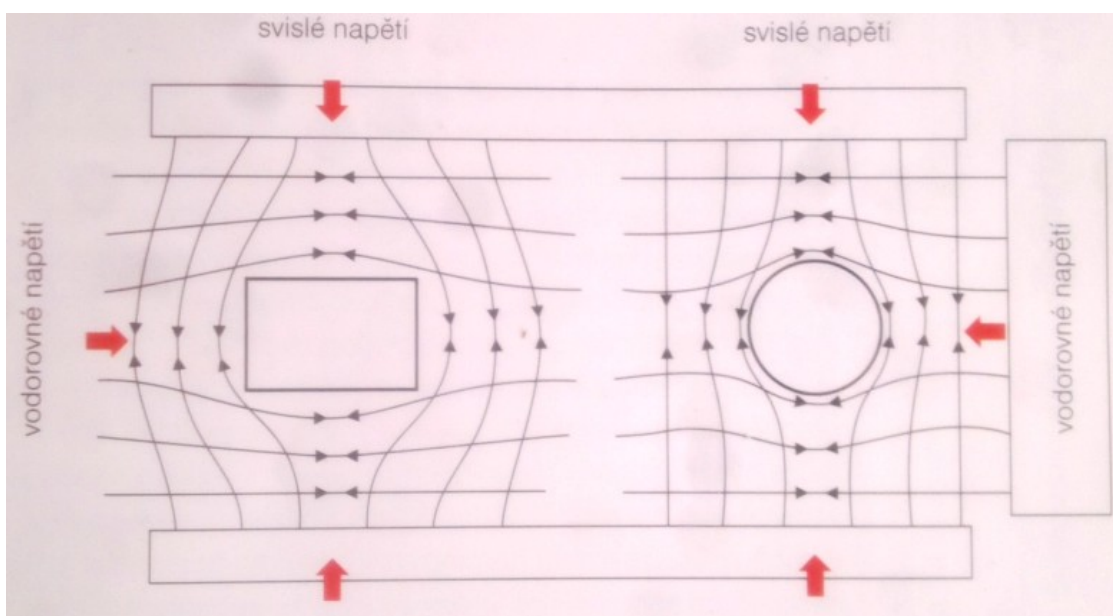
Obr. 1 Ocelová oblouková výztuž



Obr. 2 Kotva typu R

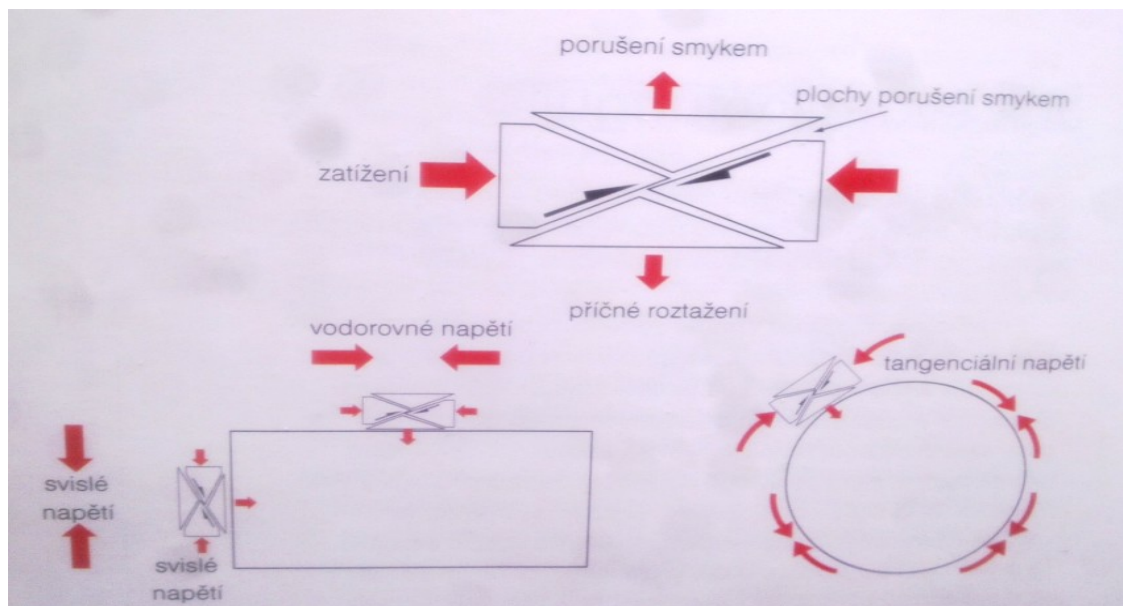
2.2. Princip chování svorníků

Primární funkce svorníků je zpevnění horniny, znamená to, že zvyšují pevnost horninového masivu, do kterého jsou svorníky nainstalovány. Tím se hornina sama stává součástí výztužného systému. Samotná hornina kolem důlních děl se může porušovat smykem podél puklin a dalších oslabených míst. Porušení je zpravidla určováno napětím, které se vytváří kolem podzemních děl. Toto napětí je pro díla s obdélníkovým profilem, vodorovné soustředěné ve stropu a počvě, svislé v bocích. U děl s kruhovým profilem lze koncentraci napětí vyjádřit jako tangenciální napětí, které obklopuje dílo.



Obr. 3 Napětí kolem podzemních děl obdélníkového a kruhového průřezu

Ve chvíli, kdy nastane zatížení rovné pevnosti horninového materiálu, nastane porušení smykem se smykovým posunutím a příčnou deformací porušené horniny či tahem. Tento jev můžeme pozorovat v tunelech nebo důlních chodbách, kde máme instalovány svorníky, jejich vzájemným přiblížením konců (tzv. „zkrácení“ stropu), a také snížením. Smyk může také zahrnovat klouzavý posun podél přednostně orientovaných puklin a jiných nespojitostí. To může být způsobeno napětím, také při velmi nízkém napětí v pevnějších horninách blízko povrchu může gravitace sama o sobě způsobit posun horninových bloků na plochách nespojitosti, či průhyb vrstev do výlomu. Rovněž mohou kusy horniny jednoduše vypadnout, což je způsobeno porušením tahem.



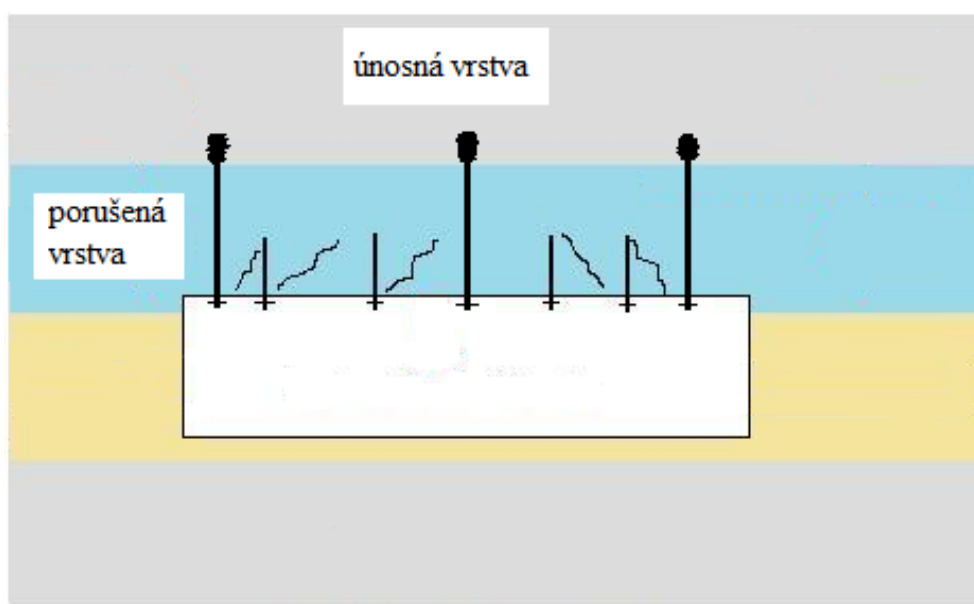
Obr. 4 Porušení smykem obdélníkových a kruhových profilů díla

Jak jsem již zmínil, svorníky po instalaci upravují chování hornin a mohou zabránit nebo omezit jejich porušení. Svorníky přenesou zatížení s nestabilní části horninového masivu na sebe a poté do stabilní horniny. Účinnost přenosu zatížení mezi horninou a svorníky je dáno pevností vazby mezi horninou a svorníky. Všechny druhy svorníků, ať mechanicky kotvených či lepených, realizují vazbu kombinací tření a spojení na rozhraní svorník – hornina u mechanicky kotvených, nebo svorník – tmel a tmel – hornina u svorníků lepených. Důležité je ovšem říct, že přilnavost nemá významnou roli na pevnost vazby. Nemůžeme považovat svorníky tmelené za „přilepené“ k hornině.

2.3. Přenos zatížení

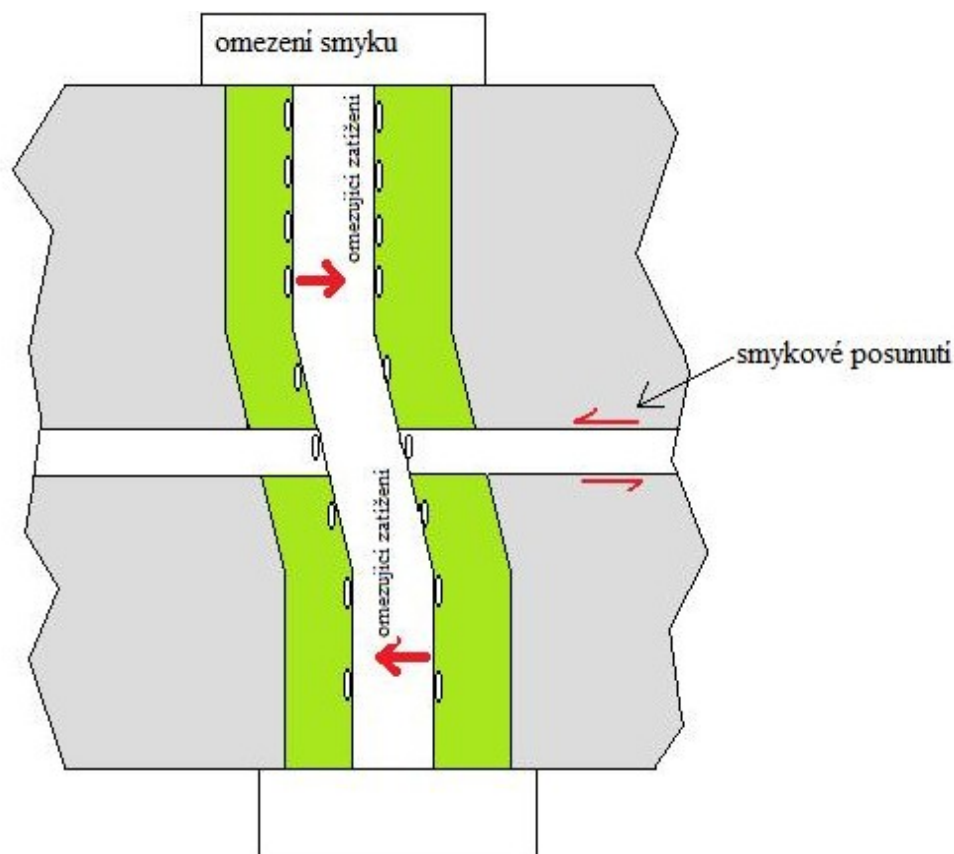
- zavěšením
- přímým omezením smykového zatížení
- omezením smykového zatížení

Zavěšení nebo kotvení bloku znamená podchycení slabé vrstvy pomocí svorníků k výše položené pevnější vrstvě. V tomto případě zavěšená zátěž působí na podložku svorníků a je přenesena pomocí svorníků do výše položené stabilní vrstvy. Využívají se zejména kotvy mechanické. Tato jednoduchá situace je však v dnešním použití svorníků neobvyklá. Na tomto principu je dnes založená metoda vysokého kotvení. Vysoké kotvení nám umožňuje vyztužení, neboli podchycení volných bloků, klínu v silně porušeném horninovém masivu, kdy skrz porušené vrstvy kotvíme do navazujících stabilních vrstev.



Obr. 5 Zavěšení bloků rozrušené vrstvy o výše položenou únosnou vrstvu

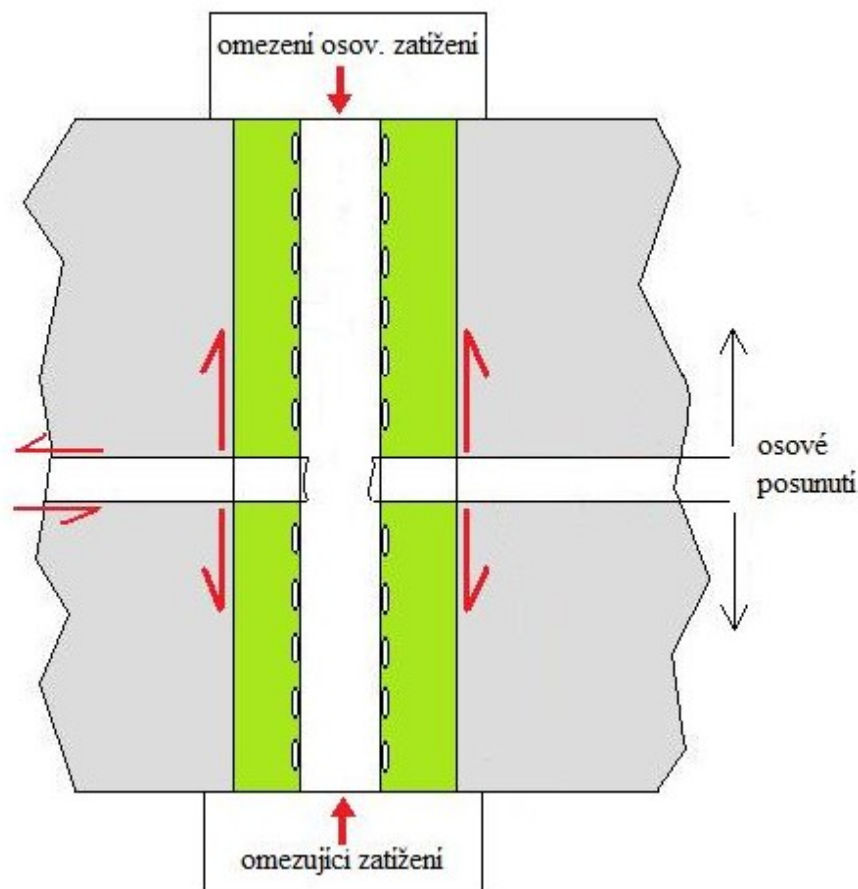
Přímého omezení smykového zatížení dosáhneme vložení svorníků skrz potenciální smykové plochy. Pro tento případ používáme svorníky tmelené po části délky nebo plně tmelené v celé délce. Plně tmelené svorníky jsou nejefektivnější, jelikož poskytují okamžitý odpor. V důsledku plného spojení dochází k drcení horniny a tmele, samotný přenos zatížení probíhá ohnutím svorníku, které také vytvoří osově zatížení. „Přímé omezení smyku je účinné při zabraňování posuvného pohybu na plochách porušení, ale je méně užitečné při omezování porušení smykem u horninového materiálu.“ [1]



Obr. 6 Přímé omezení smykového posunu

Instalaci svorníků napříč potenciální smykovou plochou omezujeme osově zatížení. Osovým omezením bráníme příčnému rozpínání spojenému se smykovým pohybem. I v tomto případě jsou nejvyužívanějším typem plně tmelené svorníky. Přenos zatížení způsobuje osově tahové namáhání ve svornících soustředěné v místě smykové plochy. „To slouží jako svěrné zatížení zvyšující normálovou sílu a tedy i smykovou pevnost, což omezuje porušení smykem.“ [1] Opět zde platí, čím pevnější a tužší vazba (tmel – hornina) tím efektivnější přenos zatížení. U bodově tmelených a zčásti tmelených

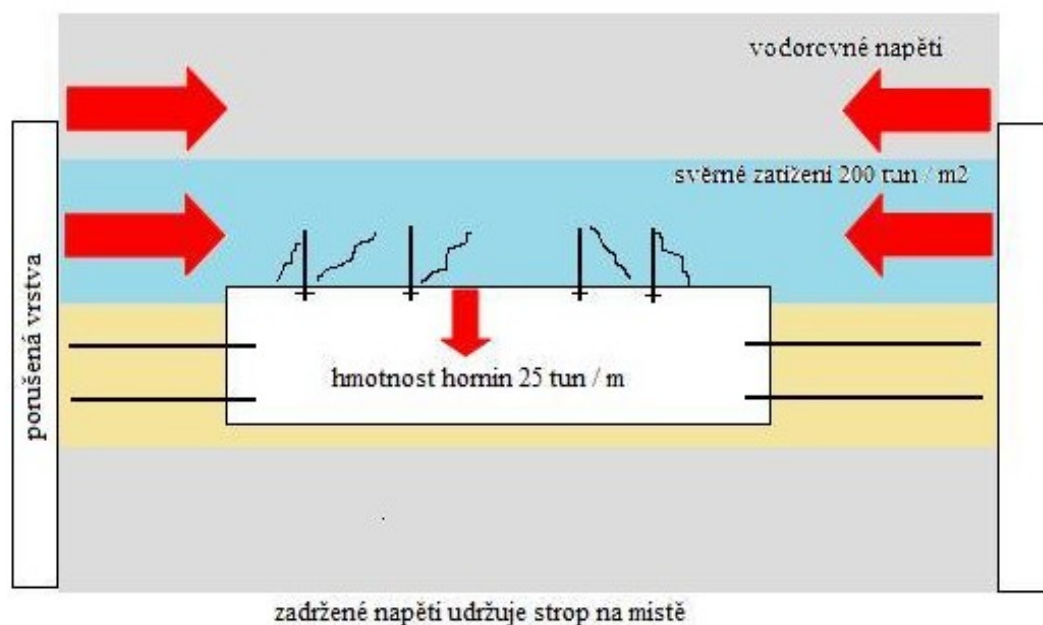
svorníků je svěrné zatížení daleko menší, ale deformace vyvolaná příčným roztažením je větší. Pokud využíváme kotvy předpínané, vytváří v hornině nad podložkou svorníků oblast stlačení. „ To vede k stahování nespojivosti a zvyšování smykové pevnosti na plochách nespojivosti, čímž se zvyšuje účinnost svorníků.“ [1] Z důvodu toho, že svorník je mnohém tužší než hornina (cca patnáctkrát), ztrácí se původní napětí s malou deformací horniny nad podložkou v důsledku lokálního drcení, porušování a tečení nebo prokluzem ukotveného konce.



Obr. 7 Omezení osového zatížení

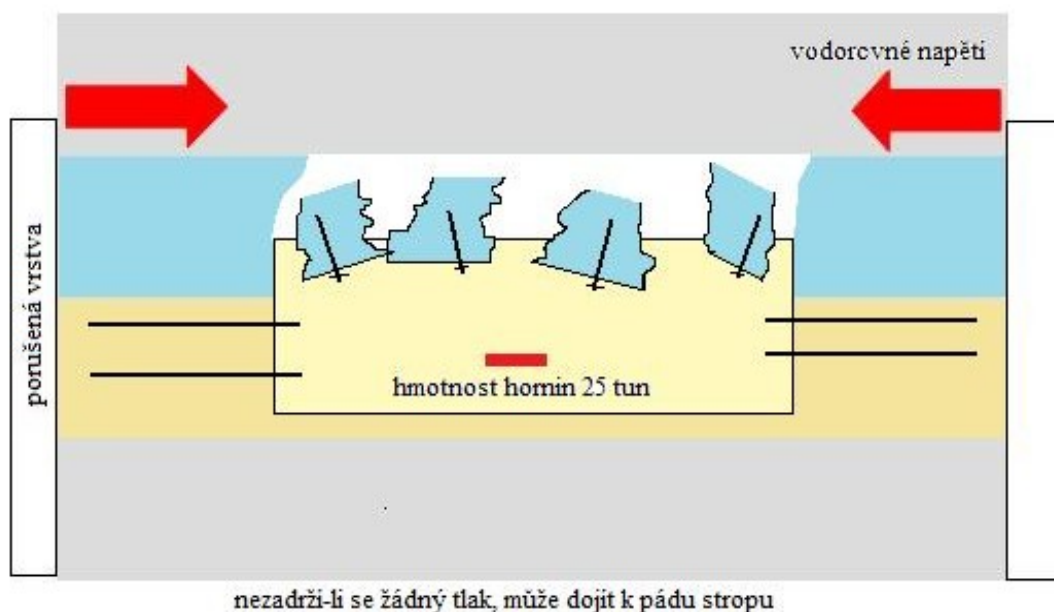
2.4. Udržení stavu vodorovného napětí ve stropu

Úspěšnou aplikaci svorníků v důlním díle dosáhneme udržením významné úrovně vodorovného napětí ve stropu obdélníkových profilu a obvodového napětí u profilu kruhových. Například v nadloží obdélníkového profilu v hloubce 200 metrů při parametrech horniny: objemová tíha 25 kN/m^3 , poissonova konstanta 0,3 dosáhneme vodorovného napětí 2MPa, z čehož vyplývá, že každým čtverečním metrem horniny se přenáší vodorovná síla o velikosti cca 200tun. Hmotnost horniny ve výšce 2m nad profilem díla šířky 5m je kolem 25 tun na metr čtvereční. Z toho vyplývá, vodorovný tlak je tak velký, že zabrání vylomení a pádu bloků. Ovšem pokud se strop pod touto zátěží poruší, přenášená zátěž se sníží a vodorovné napětí se přerozdělí výše do stropu.



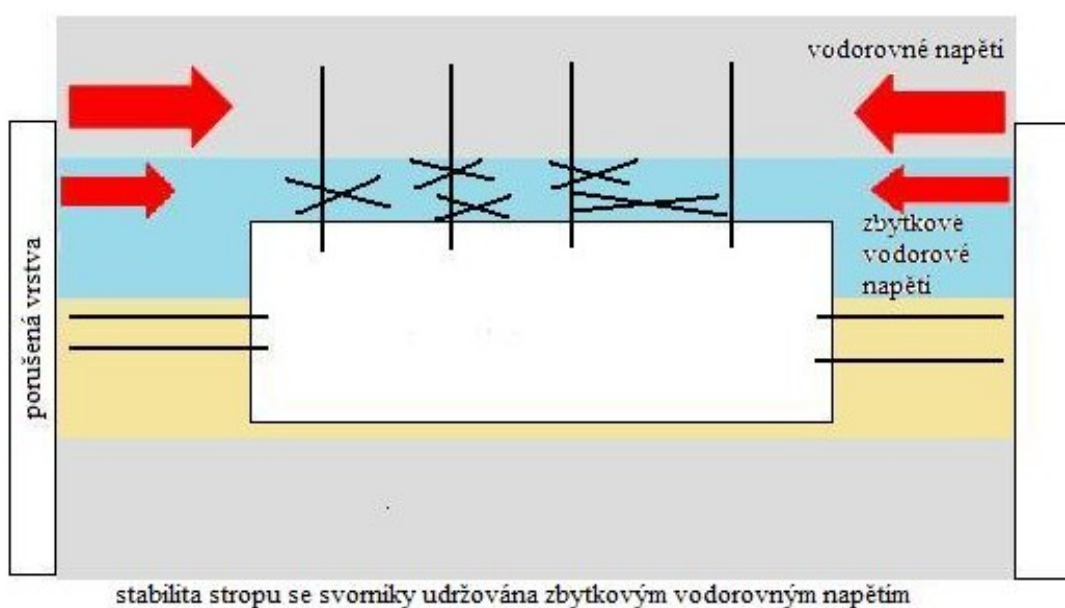
Obr. 8 Udržení napětí ve stropu díla

Ve finále může nastat situace, kdy přesunuté napětí se sníží natolik, že dojde k vylomení stropu (porušení). Svěrné zatížení je natolik malé, že vlastní tíha horniny je vyšší a nastane porušení stropu.



Obr. 9 Svěrné zatížení je menší než hmotnost horniny, může dojít k pádu stropu

Poslední varianta udržení napětí ve stropu je u namáhaných méně pevných hornin. Tyto horniny se typicky vyskytují v hlubokých černouhelných dolech a představují asi nejnáročnější aplikaci svorníkových systému. Problematické jsou vysoké výchozí hodnoty napětí a klíčová je vysoká pevnost vazby a tuhost plně vázaného systému pro maximalizaci výztužného efektu. Díky velkému vodorovnému napětí dochází ke smykovému porušení, tím pádem stabilita stropu závisí na udržení bezpečné zbytkové úrovně vodorovného zatížení. Omezení osového zatížení poskytované svorníky je v této situaci klíčem ke stabilitě stropů.



Obr. 10 Výztuž slabého stropu v podmínkách vysokého napětí

Závěrem této první kapitoly bych chtěl ještě jednou zdůraznit, že výztužná funkce svorníků je předcházení nebo omezení smykového porušení horniny obklopující důlní dílo pomocí osového a přímého omezení smyku. V oblasti instalovaných svorníků zůstává úroveň napětí dostatečně vysoká, aby uchovala důlní dílo ve stabilním stavu.

3. Aplikace tzv. „vysokého kotvení“ v prubních chodbách určených ke dvojímu využití

Systém vysokého kotvení u nás aplikujeme v prostředí černouhelných dolů s hloubkou nad 700m. Samotné vysoké kotvení používáme v kombinaci s ocelovou výztuží, která dnes už sama v těchto hloubkách nestačí. Klasická ocelová výztuž je dnes značně navýšená (váhový stupeň TH 36 a hustota budování á 0,5m), přesto únosnost výztuže nestačí a volíme kombinaci se svorníkovou výztuží. Tuto kombinaci volíme také při projektování chodeb určených k dvojímu využití, kdy dbáme na zvýšenou únosnost a snížení deformace této chodby.

3.1. Vysoké kotvení

„Vysoké kotvení je podpěrný systém výztuže dlouhých a velkoprostorových nebo atypických důlních děl, spočívající v zakotvení prvků výztuže do pevných poloh (vrstev) ve vyšším nadloží nad vyztužovaným důlním dílem.“ [2] Vysoké kotvení má několik částí, ze kterých se skládá. Z podvlaků podepírajícího stropní oblouky nebo roviny podpěrné výztuže, zakotvené pomocí kotev do pevných vrstev ve vyšším nadloží. Veškeré síly působící na výztužné konstrukce, například ocelová oblouková výztuž, se vysokým kotvením přenášejí do horninového masivu. Zatížení podpěrné výztuže se sníží. Z principu vysokého kotvení také vyplývají požadavky na geologickou a geomechanickou stavbu horninového masivu, do něhož bude v nadloží díla kotva uchycená.

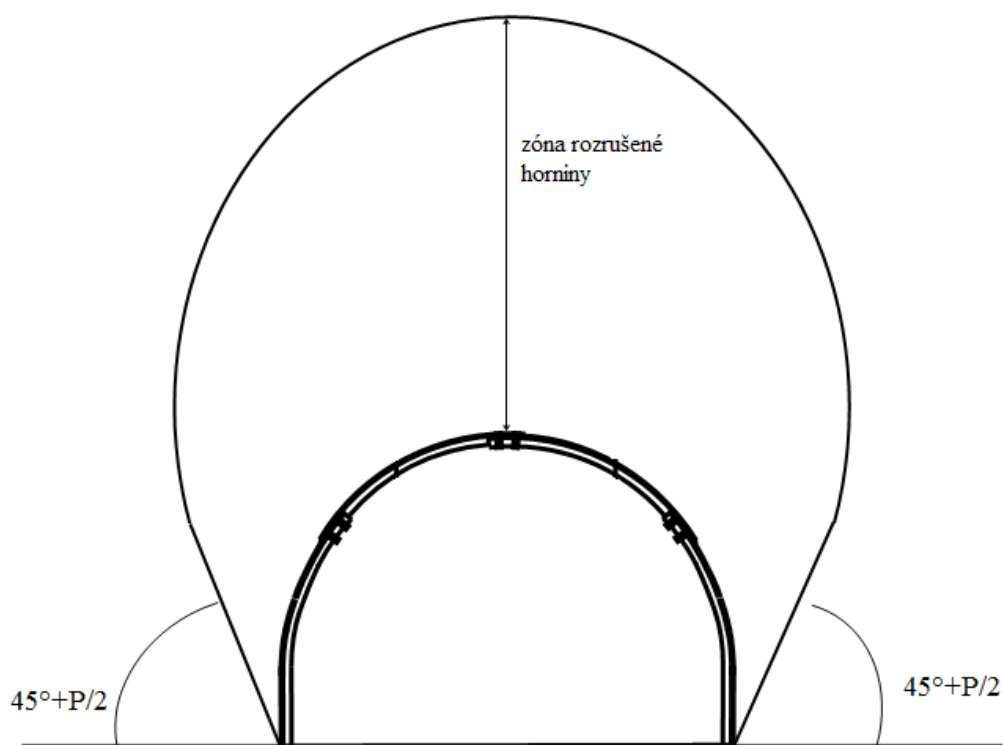
3.2. Princip a návrh vysokého kotvení

„Účelem vysokého kotvení pro stabilizaci důlních děl je zesílit podpěrnou výztuž důlního díla tak, aby vyhovovala přídatným zatížením vznikajícím při vedení stěnových porubu, případně dalším očekávaným přetížením a dílo zůstalo stabilní po požadovanou dobu životnosti.“ [2] Samotný návrh vysokého kotvení je rozdělen v následujících krocích:

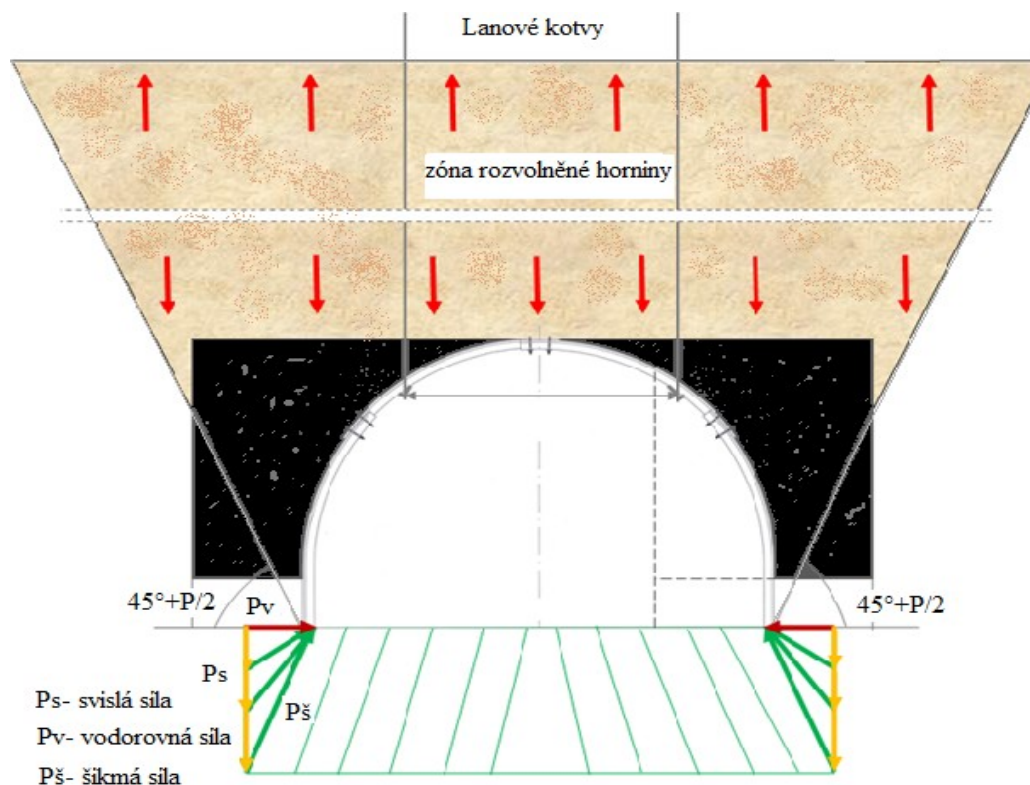
- návrh základní podpěrné výztuže pro dané dílo, dle výpočtu únosnosti výztuže v dané oblasti;

- určení velikosti přetížení daného díla z důvodu přídatných tlaků v předpolí stěnového porubu, z důvodu propojování oblasti rozvolnění pod klenbou dlouhého díla s oblastí zavalování nad stěnovým porubem, a také z jiných specifických důvodů;
- návrh vysokého kotvení na základě očekávaného přetížení a geologických poměrech nadloží;

Jako každá technologie tak i problematika vysokého kotvení skýtá několik základních pravidel a problémů. Základní princip samotného vysokého kotvení jsme si už objasnili a spočívá v kotvení prvků výztuže do pevných poloh ve vyšším nadloží. Po samotné výstavbě důlního díla vzniká tlak horninového prostředí na výztuž. Velikost zatížení výztuže je rovno tíze uvolněných zemin pod klenbou přirozené rovnováhy. Vycházíme z modifikace klenbových teorií. Samotný tvar klenby ovlivňuje několik faktorů, kterými jsou vrstevnatost a trhlinovitost prostředí. V našem případě, kdy se bavíme o hloubkách nad 700m, je nutné si uvědomit mnohem větší následky porušení rovnováhy masivu. V těchto hloubkách nastávají posuny v desítkách centimetrů a tlaky se projevují také ze strany počvy a boků díla. Proto v těchto hloubkách přistupujeme k otázce určení zatížení výztuže. „Teorií máme několik klenbová teorie, metody teorie mechaniky kontinua a metody inženýrské.“ [3]



Obr. 11 Schéma klenbové teorie dle Protodjakonova pro kruhové dílo

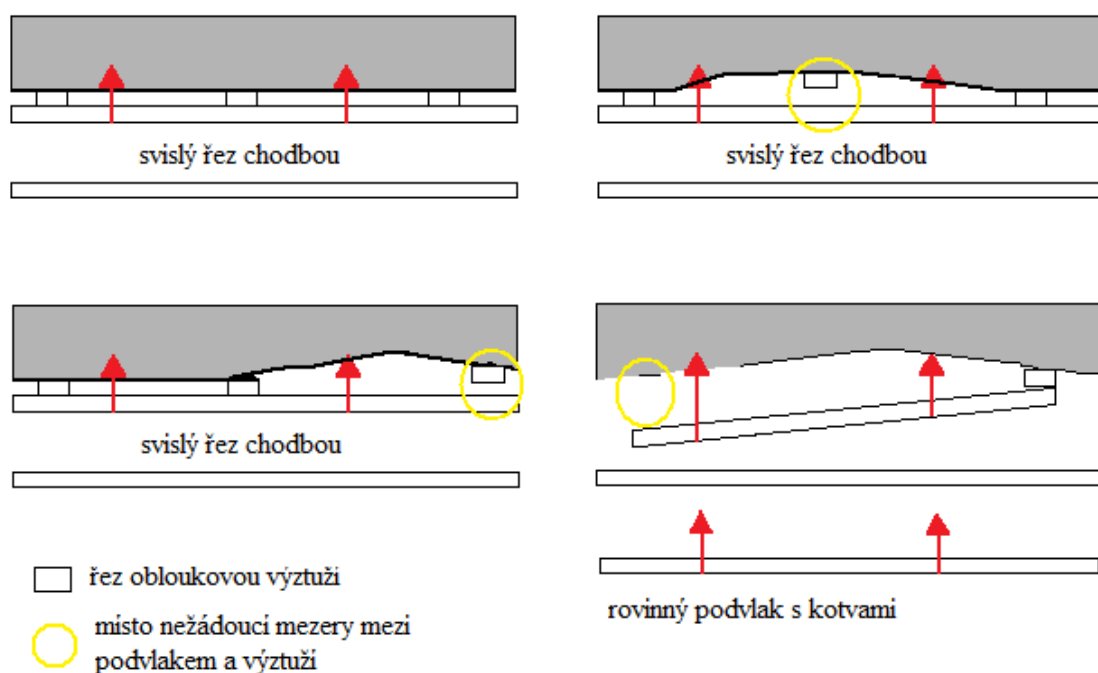


Obr. 12 Schéma rozkladu sil v počvě díla a možnost bubření samotné počvy

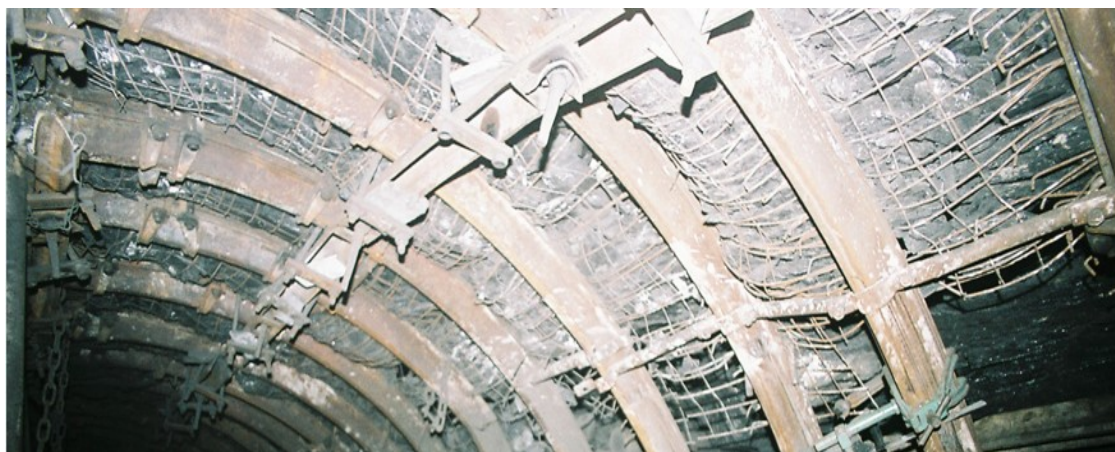
Nyní už jsme schopni zjistit podle jedné z teorií velikost klenby a z toho vyplývající zatížení na konstrukci. Dle velikosti zatížení dimenzujeme podpěrnou výztuž, která již mnohdy nestačí, a proto ji volíme v kombinaci s dlouhými kotvami. Další možností je, počítání s přitížením výztuže a opět kombinace s dlouhými kotvami. Kotvy prochází skrz uvolněné horniny pod klenbou a kotvíme je ve vyšší únosné vrstvě. Podle velikosti rozrušené (uvolněné) horniny volíme délku kotev. Délky kotev se pohybují různě od 2 do 15 metrů. Kotvy jsou uchyceny minimálně jeden metr od rozvolněné vrstvy. Je ovšem problém přesně definovat a lokalizovat, kde tato rozvolněná vrstva končí. Vždy bychom měli jít na stranu bezpečí a volit délku samotné kotvy i vrtu o něco větší. Kořen kotvy v únosné vrstvě lepíme například pomocí ampulí Lokset. V rozrušené vrstvě můžeme kotvy lepit po celé délce. Musíme si ovšem uvědomit, že spotřeba lepidla v rozrušené vrstvě může být větší (zaplnění trhlin, prasklin). Taktéž otázka zda kotvy předpínat či nikoliv je sporná viz kapitola 4.2.

Přenos zatížení mezi výztuží a kotvou dochází přímo výztuž - kotva (lichoběžníkový profil díla) nebo pomocí rovinných podvlaků, které jsou mezi výztuží a kotvou (obloukový profil díla OKR). Problém nastává v reálném důlním provozu, kdy podpírané oblouky ocelové výztuže, jsou různě výškově přesazené, takže některé po instalaci a ukotvení podvaku se

s ním vzájemně nedotýkají. Vzniká mezera mezi podvlakem a příslušným obloukem a tím nerovnoměrný přenos síly oblouk – podvlak. S narůstající délkou podvlaku vzniká větší nebezpečí mezer mezi obloukem výztuže a podvlakem. Podle zkušenosti nebezpečí mezer narůstá s dobou, po kterou je důlní dílo vystaveno tlakům horniny před realizací vysokého kotvení. Realizuje – li se vysoké kotvení bez zbytečných průtahů ihned po vyražení díla, je možno předpokládat určitou rovnoměrnost v zabudovaných obloucích a tedy i menší nepravidelnost uložení horních oblouků. Protahání táhla kotvy samotným podvlakem je vypáleným otvorem v podvlaku. Toto zeslabené místo v podvlaku kompenzujeme speciálními podložkami, které příznivě ovlivní průběh ohybových momentů v oblasti zavěšení podvlaku ke kotvě.

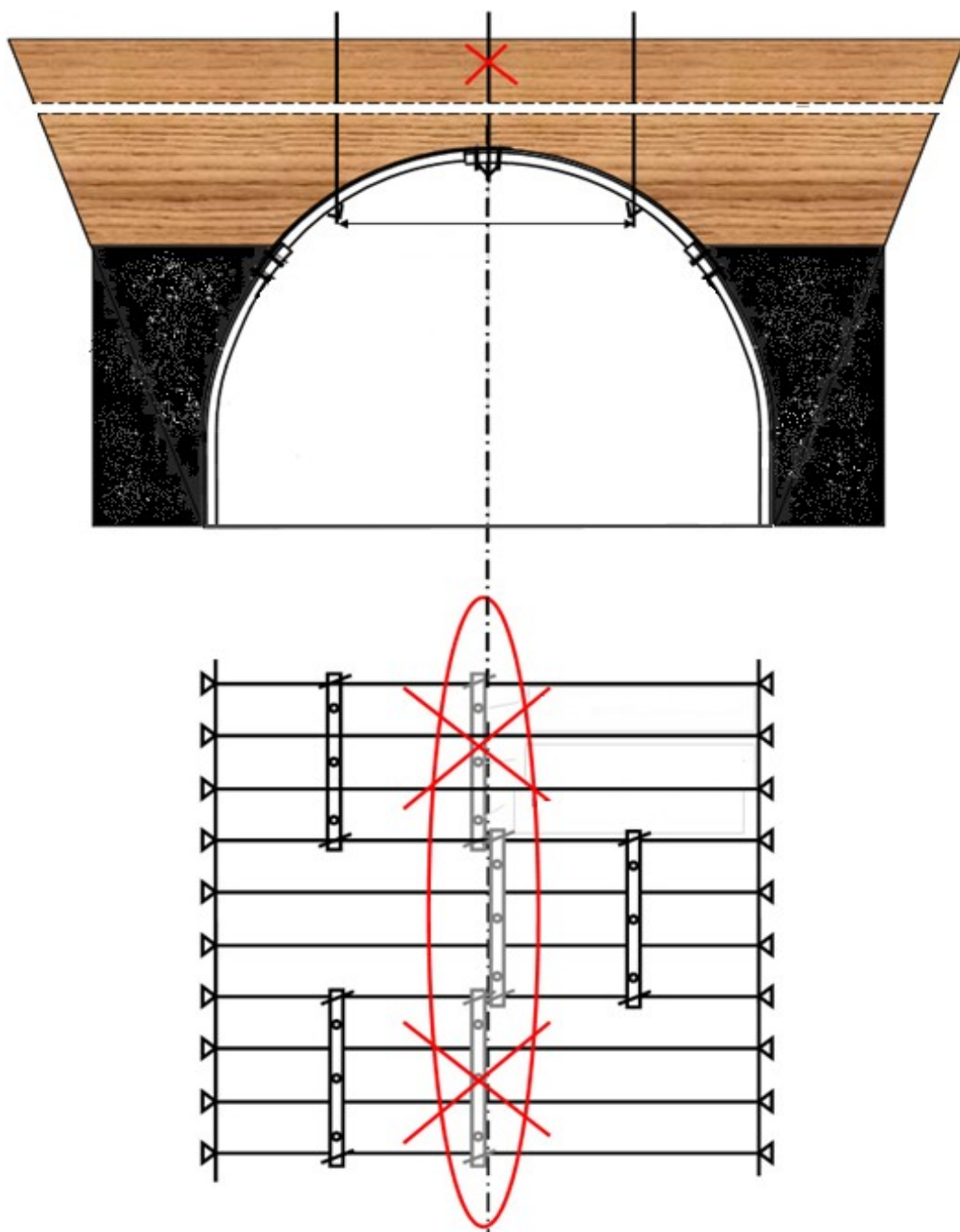


Obr. 13 Schéma podepření výztužných oblouku s rovinnými podvlaky

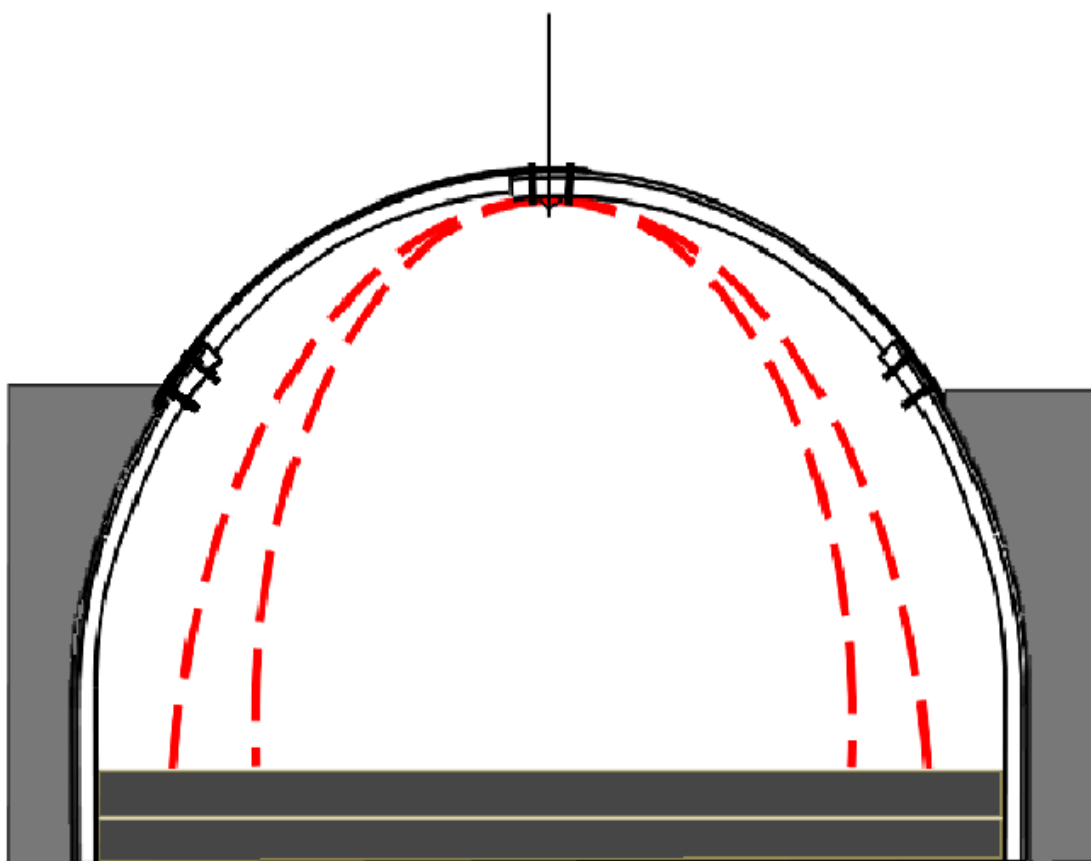


Obr. 14 Rovinné podvlaky přes obloukovou výztuž uchyceny pomocí kotev

Rozložení kotvených podvlaků v důlním díle je možné řešit různě s ohledem na technologické aspekty a zejména na působení největších tlaků a tím spojená jejich minimalizace vlivu na deformaci výztuže. Podvlaky instalujeme průběžně v ose díla nebo mírně vyosené. Vzniká tak průběžná, relativně tuhá podpěra. Od této metody instalace by se mělo opustit vzhledem k možné deformaci zbytku výztuže. Jsou i další způsoby jak podvlaky rozmístit, ale nejdůležitějším aspektem pro rozmístění podvlaků je působení největších tlaku, místo rozvolněné oblasti, strana přilehlá k porubu atd. V těchto případech adekvátně prodlužujeme délky kotev a volíme šachovnicové uspořádání podvlaků.



Obr. 15 Ukázka správné varianty (šachovnicového) rozložení podvlaků

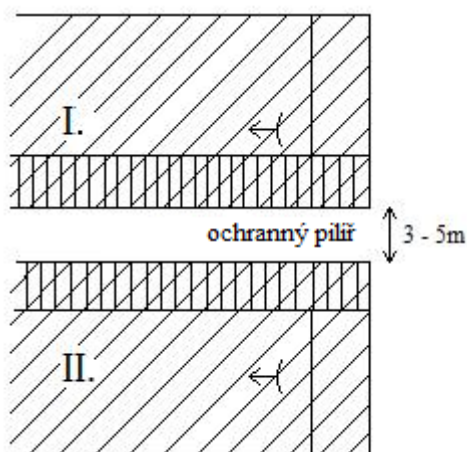


Obr. 16 Uchycení kotvy s podvlakem v ose díla, následná deformace výztuže a bubření počvy z důvodu bočních tlaků v počvě díla

Problém číslo dvě je kvalitní kontakt podpěrné výztuže a horniny. Není-li zajištěn tento kontakt, pak se technicky nejedná o kombinovanou výztuž, jednotlivé systémy oblouková výztuž - kotva nespolečně pracuje a podpěrná výztuž nepomáhá plně stabilizovat a zvyšovat tuhost nadloží. Správný způsob spolupráce nastává tehdy, kdy je zajištěn kontakt výztuže a horniny například zastříkáním betonu, pomocí vaků s plnivem atd. Pokud je takto zajištěn výrub, má smysl zde použít kombinovanou výztuž (kotva – výztuž). Naopak kotvit oblouky dlouhými kotevními prvky, aniž by výztuž podepírala horninu, není technicky optimální. Hornina se nejprve bude deformovat, přičemž může dojít k překročení tuhosti vyztuženého bezprostředního nadloží a teprve následně dolehne na obloukovou výztuž a zatíží i instalované dlouhé kotvy. Problémem může být, že tou dobou už je strop natolik porušený, že princip zavěšení už fungovat nebude. Navíc za další potíž se může považovat samotná zkouška vysokého kotvení, když při ní zvedneme obloukovou výztuž, aniž bychom se dostali na hranici samotné únosnosti kotvy (tahová zkouška).

3.3. Porubní chodby určené ke dvojímu využití

Jedena z hlavních otázek, která se dnes při hlubinném dobývání uhlí řeší, je optimalizace ražení a vyztužování přípravných důlních děl, především porubních chodeb. Klade se důraz na produktivitu a maximální využití nákladných dobývacích komplexů. S přihlédnutím na tento fakt jsou dnes zvýšené požadavky na zajištění porubních chodeb. V současné době přitom vzrůstá tlak na dvojí použití porubních chodeb pro sousední poruby, což dále zkracuje neproduktivní období a zvyšuje výtěžnost i koncentraci dobývání. Poruby běžného typu měly nevýhodu, že mezi jednotlivými porubními chodbami musí být ponechán ochranný pilíř. Z ekonomického hlediska to je nevýhodné a přistupuje se k chodbám dvojího využití. Tyto chodby ovšem vnášejí větší nároky na výztuž a stabilizaci chodeb, které čelí daleko výraznějším napětovým a deformačním zatížením než porubní chodby běžného typu.



Obr. 17 Ochranný pilíř mezi porubními chodbami běžného typu

Chodba určena ke dvojímu využití znamená, že úvodní (těžní) chodba současného porubu bude využita jako výdušná chodba porubu sousedního. „Dvojí využití chodeb je možno realizovat beze zbytku jen ve vhodných geologických podmínkách, které jsou dány dobývanou mocností sloje, kvalitou nadložních i podložních hornin z hlediska jejich pevnosti a geomechanických vlastností a vlivy.“ [4] Chodba určena ke dvojímu využití přináší vyšší požadavky na únosnost a snížení deformace výztuže chodby. Abychom snížili deformace v hornině okolo díla, nezbyvá než použít svorníkovou výztuž, která snižuje rozvolnění hornin i konvergenci díla. Samotnou svorníkovou výztuž nemůžeme použít, z důvodu odnímání bočních podpěr horninového nosníku při dobývání obou porubů, a tím spojené riziko ztráty stability. Opět budeme využívat pro zabezpečení

chodby dvojího využití kombinovanou výztuž, skládající se z podpěrných ocelových oblouků a ze svorníkové výztuže ve stropě případně v bocích chodby.

3.4. Vysoké kotvení v porubních chodbách určených ke dvojímu využití

Při projektování chodeb dvojího využití je nutné brát v potaz její dvojitý účel. Velikost profilu díla při druhém použití musí být bezpečně velký pro zajištění dostatečného větrání. Velikost průřezu chodby musí být o minimálně 1 stupeň větší než u jednorázového použití (velikost 16 – 18 a větší). „V dané oblasti je nutno podrobně posoudit a zhodnotit míru nebezpečí vzniku samovznícení uhlí a teprve po komplexním posouzení rozhodnout o vhodnosti dvojího použití.“ [4] Chodby dvojího využití razíme buď pod stropem sloje, nebo s přibírkou stropu v závislosti na eventuální přítomnosti blízké sloje či stařin v nadloží. Počva chodby by měla být v pevné hornině. Mocnost sloje by měla být menší než světlá výška chodby.

Chodby dvojího využití by měly být vyztužené kombinovanou výztuží, kombinace oblouková výztuž a svorníků (kotvy). Jednotlivé části výztužného systému by měly být dimenzovány podle geologických poměrů v okolí díla a podle tlakových poměrů. Oblouková výztuž by se měla budovat přímo na čelbě, nebo v některých případech v odstupu od čelby. Jiná možnost je, že po vyrazení o danou zabírku, se chodba v oblasti čelby vyztuží svorníky a sítí proti pádu kamene. Dále pak po 25 až 30, výjimečně až 40 metrech za razicím kombajnem se staví oblouková výztuž. Poté prostor mezi obloukovou výztuží a horninovým masivem založíme výplní. Svorníky lepíme po celé délce, jejich délka se pohybuje okolo 3 metrů, únosnost 200 – 250 kN. Vysoké kotvení respektive dlouhé lanové kotvy začaly být používány z důvodu lepší stabilizace chodby. Stropní oblouky jsou opět v ose díla podepřeny rovinnými podvlaky, které jsou přikotvené do únosného nadloží. Lanové kotvy jsou v délce až 15 metrů, jejich rozmístění je v závislosti na mocnosti nadložních vrstev horninového masivu a jeho geomechanických vlastnostech (1m od sebe v ose díla). Lanové kotvy jsou zabudované uprostřed mezi oblouky a v ose díla jsou rozmístěny šachovnicově. Nejdůležitějším faktem u instalace vysokého kotvení v porubních chodbách je, že proběhne v předstihu před porubní frontou. Dodržení tohoto předstihu je jeden z faktů pro správnou funkci kotev. Lanové kotvy musí být instalovány do ještě dobýváním nenarušeného horninového masivu a u kořene kotvy jsou lepené.

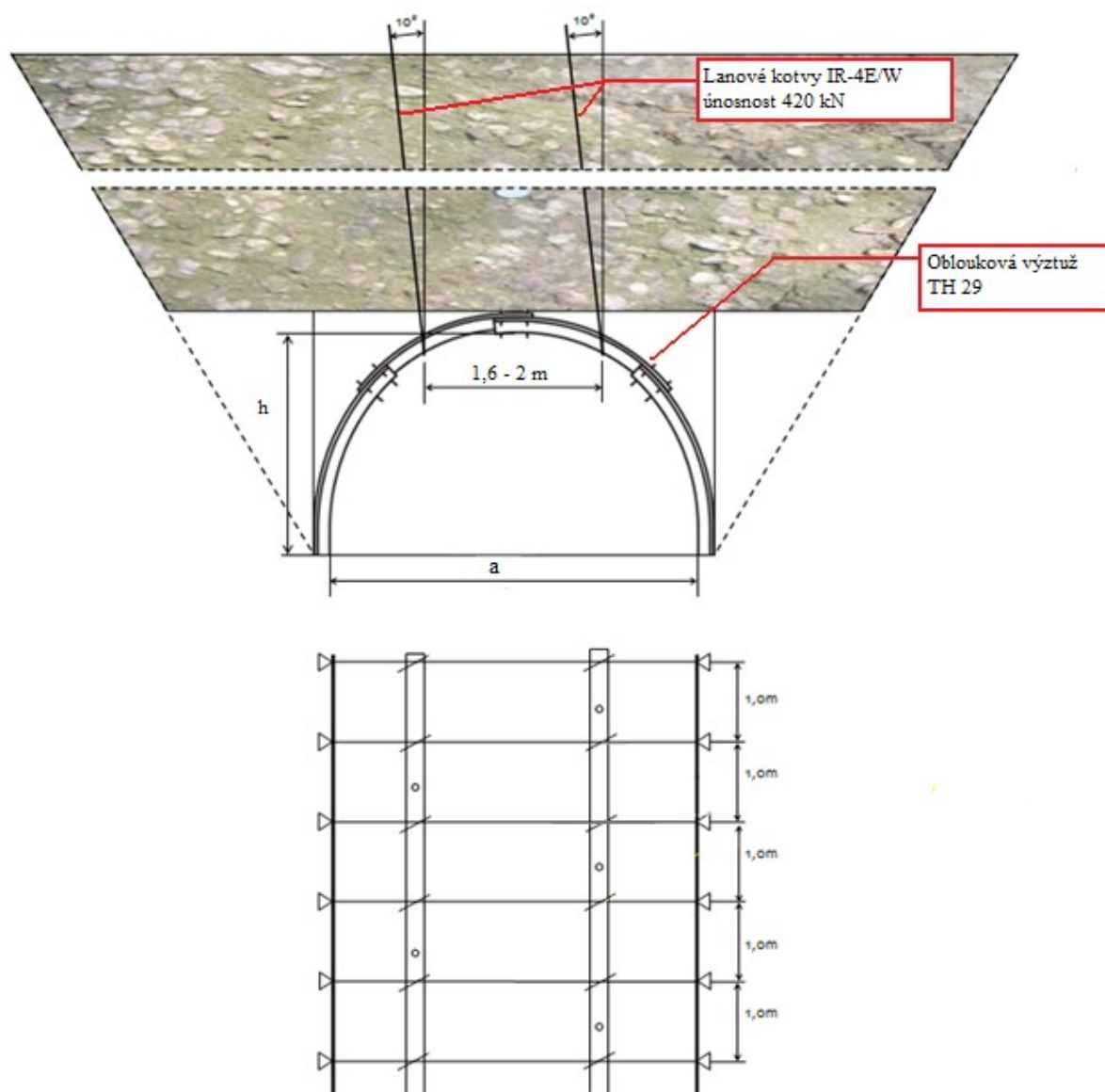
Boky chodby kotvíme pomoci podvlaků, přichyceny ve vzdálenosti okolo 1,5 metru od počvy tyčovými kotvy délky 3metry. Rozmístění těchto kotev v podélném směru je s roztečí okolo 1,5 metru. Tyčové kotvy v bocích díla lepíme po celé délce. Otázka je, zda předpínat či nikoliv viz kapitola 4.2. Musíme také počítat s přibírkou počvy, pokud počvu nijak nezabezpečíme (např. sklolaminátové svorníky nebo uzavřená oblouková výztuž). V místech s výrazným tektonickým oslabením bude nutno používat i metody zpevňující injektáže.



Obr. 18 Výztužení porubní chodby

Pro správnou funkci kombinované výztuže musíme respektovat charakteristiku obou hlavních typu výztuže (svorník, ocelová oblouková výztuž). Svorníková výztuž musí zpevnit horninový masiv u čelby, zajistit stabilitu chodby bezprostředně při ražení a snížit celkové deformace okolních hornin v období dobývání. Podpěrná ocelová výztuž musí mít zajištěný kontakt horninový masiv podpěrná výztuž, poté postupně přebírá část zatížení dále za čelbou a zejména v období ovlivnění dobýváním v přilehlých porubech, kdy dochází k výraznějším deformacím. Samotné lanové kotvy přenášejí zatížení působící na podpěrnou obloukovou výztuž do pevného nadloží. Posledním důležitým faktem u chodeb

dvojího využití je monitoring. Na chodbách určených pro dvojí využití jsou do stropu instalovány mechanické extenzometry, s jejichž pomocí sledujeme pohyb nadložních vrstev a poklesy stropu v důlních dílech. Dále také měříme konvergenci a provádíme vizuální kontroly.



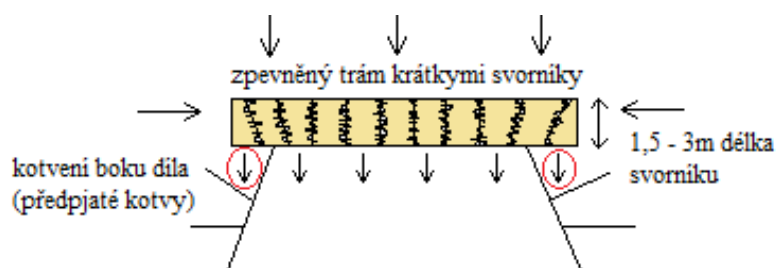
Obr. 19 Příklad kombinace obloukové výztuže a vysokého kotvení

4. Technologie pramencových kotev a problematika jejich spolupráce s krátkými tyčovými svorníky

V předchozích kapitolách jsme se seznámili s problematikou vysokého kotvení. Řešili jsme spolupůsobení podpěrné výztuže a dlouhých kotev. Tato kombinace výztuže je tzv. evropským řešením. Americko - australská metoda výztuže je založená na samotné svorníkové výztuži, primární zajištění (primary support) krátkými svorníky a sekundární zajištění (secondary support) s dlouhými lanovými svorníky. Tato modifikovaná metoda výztuže se u nás v OKR používá v chodbách dvojího využití, je to kombinace krátkých svorníků, podpěrné obloukové výztuže a dlouhých kotev. Je nutno ale podotknout, že technologicky tato metoda neodpovídá postupům v USA (pozdní budování základek).

4.1. Spolupráce krátkých tyčových svorníků a dlouhých pramencových kotev

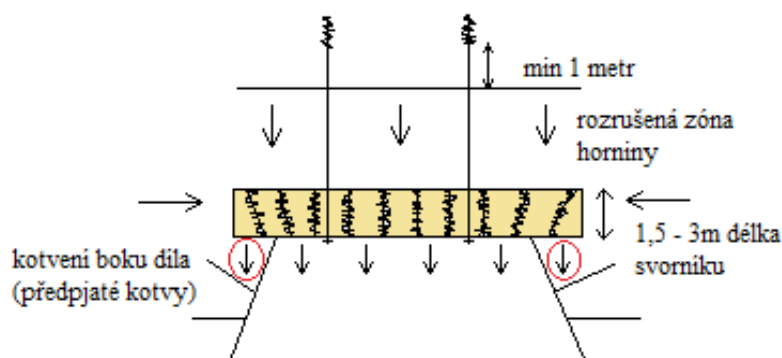
Primární zajištění horniny nad výrubem pomocí krátkých svorníků má za úkol vyztužit a stabilizovat bezprostřední nadloží (klenbu nebo nosník). Krátké svorníky délky (1,5 – 3 m) přenáší tahové a smykové napětí. Nesmí dojít k rozvolnění nadloží (oddělení vrstev) a k prolomení nadloží vertikálním nebo horizontálním napětím. Pokud toto primární zajištění horniny provedeme správně, vznikne nám vyztužený blok relativně tuhé horniny. Takovéto zajištění je rovněž základem bezpečnosti práce na pracovišti, omezíme tím riziko pádu horniny a je možno provádět další činnosti.



Obr. 20 Schéma zpevněného nosníku pomocí krátkých svorníků

Dlouhé kotvy se instalují v druhém sledu. Jejich cílem již není zvýšení tuhosti bezprostředního nadloží, ale podpoření únosnosti prokotvené zóny (tuhý vyztužený blok horniny). Délka těchto lanových (pramencových) kotev se pohybuje od již zmíněných 6 až 15

metrů. Tyto dlouhé kotevní prvky mají výrazně vyšší kapacitu (300 - 600 kN) a bezprostřední nadloží se na tyto dlouhé kotvy "zavěsí".



Obr. 21 Schéma zpevněného nosníku pomocí krátkých svorníků a „zavěšení“ pomocí lanových (pramencových kotev) do vyššího nadloží

Abychom zajistili správnou spolupráci, musí být dostatečně provedené primární zajištění svorníky a dosažení tuhosti bezprostředního nadloží. V opačném případě bude mít zavěšení na dlouhé kotevní prvky omezený nebo žádný efekt. V hloubkách pod 1 km se tento koncept kotvení osvědčil, přiměřené zvýšení tuhosti nadloží a jeho následné zavěšení. Jako alternativa by zde mohlo být navrženo použití zvýšeného počtu primárních svorníků s prodlouženou délkou, které by zajistili zvětšení vyztužené zóny. Tato alternativa je především časově náročnější (více vrtání) a tedy i dražší. Důležité je ovšem říct, že v podmínkách OKR, kdy dochází k důlním otřesům, je samotná svorníková výztuž takřka nemožná a musím být kombinovaná s již zmíněnou podpěrnou výztuží. Existují sice systémy poddajných svorníků, které se dovedou přizpůsobit velkému pohybu při důlních otřesech, ovšem v OKR se jako samotná výztuž nepoužívají.

4.2. Návrh pramencových kotev a krátkých tyčových svorníků

Hustota svorníků je pochopitelně základ pro dosažení výše uvedeného. Neexistuje jednoduchý klíč nebo vzorec na stanovení hustoty, používají se sofistikované inženýrské nebo matematické modely. Nicméně existují různé tabulky, které nám uvádějí hustotu svorníků pro různě kvalitní horninový masiv. V běžné praxi se hustota pohybuje mezi 1 m²/svorník až 3 m²/svorník a to v závislosti na geologických podmínkách (pevnost horniny, stabilita, vrstevnatost atd.)

Rovněž důležitým aspektem při návrhu je orientace svorníků. Jejich úklon je volen tak, aby reflektoval předpokládaný směr horninového tlaku a instalované svorníky tak měly co nejlepší funkci. Svorníky instalované po směru tahu (tahové svorníky), kolmo na tlak jsou svorníky stříhové, viz kapitola 2.3. Rovněž je jejich úklon volen s ohledem na úklon vrstev. Snažíme se vrstvy protnout a ne jít paralelně s vrstevnatostí. Samozřejmě nakonec jsou zde i omezení na pracovišti a možnost, kde a pod jakým úhlem lze vrtat.

Návrh délky svorníků a lanových kotev není přesně dán. Měla by existovat flexibilita a možnost svorníky prodloužit v závislosti na geologické situaci. V dnešní době, kdy variabilita materiálů je obrovská, nám nečiní problém si zvolit libovolnou délku a únosnost. Krátké tyčové svorníky máme do délky 3 metrů a únosnosti 250 kN, lanové (pramencové kotvy) máme v délce do 15 metrů a únosnosti až 600 kN, záleží na počtu drátů a jeho průměru.



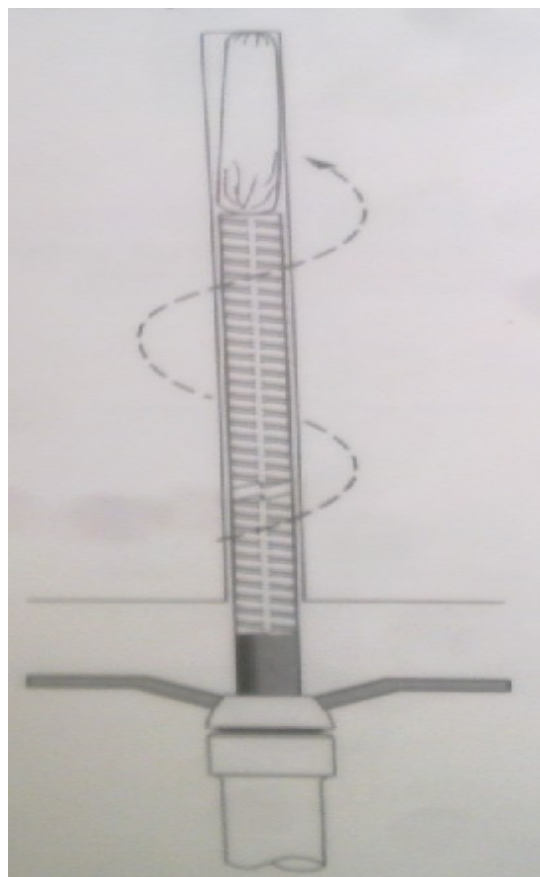
Obr. 22 Pramencová kotva typu FLEXIBOLT

Poslední faktor, který zde byl už mnohokrát napsán a má nedílnou součást na únosnosti svorníků (kotev), je zda svorníky (kotvy) předpínat či nikoliv. Napínané svorníky se používaly zejména u mechanických bodově přichycených svorníků. Mělo to za efekt ten, že hlava svorníku byla řádně usazená. V dnešní době předpínané svorníky používáme i u svorníků lepených pryskyřicí. Předpínání bodových nebo částečně tmelených svorníků vytvoří v hornině nad podložkou oblast stlačení. Toto stlačení má za následek stahování nespojitosti a tím zvyšování smykové pevnosti na plochách nespojitosti. Předpínání svorníků lepených po celé délce, dosáhneme použitím dvou pryskyřic s různou dobou vytvrzování. Utahujeme matici po zatuhnutí rychlé pryskyřice, ale před vytvrzením pomalé pryskyřice, to má pak za následek vnesení napětí do svorníků i při plné délce ukotvení. Hlavní výhoda

svorníků předpínaných a lepených po celé délce je, že se podložka svorníků přitiskne těsně ke stropu a veškeré otevřené nespojitosti se uzavřou. Otázka ale je, kdy má cenu svorníky předpínat a kdy nikoliv. Zjednodušeně například dlouhé kotvy má cenu předpínat tehdy, kdy mají ponechanou volnou délku a jsou zakotveny přímo na horninu, která je relativně kompaktní. Naopak nemá cenu předpínat tehdy, kdy nelze trvale zajistit napětí, opíráme se o volnou podpěrnou výztuž nebo je hornina ve velice špatné kvalitě. Poté je lepší kotvy lepit po celé délce.



Obr. 23 Ampule s pryskyřicí Lokset



Obr. 24 Otáčení ampule ve vrtu

5. Návrh parametrů „vysokého kotvení“ pro dvojí využití chodeb, návrh konstrukce pro případ z praxe

V posledním bodě řešíme návrh obloukové výztuže a vysokého kotvení ve zdejších podmínkách OKR. Pro zjednodušený výpočet jsem použil upravený vzorec pro výpočet zatížení q_n , který je upraven pro místní podmínky. Dále dle klenbové teorie jsme zjistili velikost rozrušené vrstvy horniny. V poslední části jsme z daného schématu odečetli velikosti jednotlivých zatížení a pro výpočet samotné deformace, momentových a normálových sil použily výpočetní software.

5.1. Návrh a výpočet obloukové výztuže a vysokého kotvení

Parametry důlní chodby

Profil díla OO-O-16

Hloubka díla pod povrchem 800m

Vrstvy kolem díla (zdola nahoru)

Vrstva 1 mocnost 3m pevnost v tlaku 55 MPa

Vrstva 2 mocnost 4m pevnost v tlaku 70 MPa

Vrstva 1 mocnost 5m pevnost v tlaku 60 MPa

1. Efektivní hloubka pod povrchem H_{ef}

$$H_{ef} = k_1 \times k_2 \times H \quad (1)$$

$$H_{ef} = 1,1 \times 1 \times 800 = 880m$$

H je skutečná geometrická hloubka díla pod povrchem [m]

k_1 je součinitel ovlivnění díla dobývacími pracemi, určuje se jako poměr skutečného napětí k napětí odpovídajícímu hloubce daného místa pod povrchem. Stanoví se individuálně, například podle výsledku matematického modelování apod. Pokud nejsou k dispozici přesnější údaje, volí se minimálně $k_1=1$

k_2 je součinitel vlivu úklonu vrstev. Podle údajů pro podmínky OKR je možné koeficient považovat roven jedné.

2. Redukovaná pevnost nadložních hornin σ_r

Redukovanou pevnost nadloží σ_r stanovujeme pro úsek $2A=10,62\text{m}$. Pro výpočet redukované pevnosti uvažujeme ze třetí vrstvy jen tu část mocnosti, která doplňuje mocnost prvních dvou vrstev na hodnotu $2A$, tedy v našem případě $10,62-7=3,62\text{m}$. Hodnota A je šířka světlého profilu důlního díla ve výšce $1,7\text{m}$ nad úrovní upravené počvy.

$$\sigma_r = \beta_i \times \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{Di} \times M_{ci}}{2A} \quad (2)$$

$$\sigma_r = 0,9 \times \frac{(3 \times 55 + 4 \times 70 + 3,62 \times 60)}{2 \times 5,31} = 56,12 \text{ MPa}$$

β_i je součinitel vlivu vrstevnatosti, hodnota je v závislosti na počtu vrstev ve sledovaném úseku nadloží, pro počet vrstev ve sledovaném úseku roven třem je koeficient $0,9$

σ_{Di} je pevnost v tlaku i -té vrstvy [MPa]

M_{ci} je mocnost i -té vrstvy [m]

A šířka světlého profilu důlního díla ve výšce $1,7\text{m}$ na úrovni upravené počvy [m]

3. Normové zatížení q_n

$$q_n = 1,983 \times A \times \left(25 - \frac{C}{A}\right) \times \left(1 - e^{-0,715 \times \left(e^{0,033 \times \frac{H_{ef}}{\sigma_r}} - 1\right)^{0,6}}\right) \quad (3)$$

$$q_n = 1,983 \times 5,31 \times \left(25 - \frac{38}{5,31}\right) \times \left(1 - e^{-0,715 \times \left(e^{0,033 \times \frac{880}{56,12}} - 1\right)^{0,6}}\right) = 81,23 \text{ kPa}$$

$$= 0,08123 \text{ MPa}$$

A je šířka světlého profilu důlního díla ve výšce $1,7\text{m}$ na úrovni upravené počvy [m]

H_{ef} je efektivní hloubka díla pod povrchem [m]

σ_r je redukovaná pevnost nadložních hornin [MPa]

C je empirický součinitel popisující soudržnost horniny po porušení, příp. samostatnost nadloží, jehož hodnota se určí takto, pro nadloží pravidelně zavalující $C = 38$

4. Výška rozvolněné horniny V

$$V = \frac{q_n}{\gamma} \quad (4)$$

$$V = \frac{0,08123}{25 \times 10^{-3}} = 3,249 \text{ m}$$

q_n normové zatížení [MPa]

γ objemová tíha horniny 25 kN/m^3

5. Protodjakonova klenbová teorie X_1

Pro samotné nakreslení klenby rozvolněné horniny potřebujeme minimálně tři body. Proto musíme pomoci Protodjakonovy klenbové teorie dopočítat zbylé dva body.

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{\sigma_r - \sigma_t}{\sigma_r + \sigma_t} \right) \quad (5)$$

$$\varphi = \arcsin \left(\frac{56,12 - 4}{56,12 + 4} \right) = 60^\circ$$

φ úhel vnitřního tření $[\circ]$

σ_r je redukovaná pevnost v tlaku nadložních hornin [MPa]

σ_t je pevnost v tahu nadložních hornin [MPa]

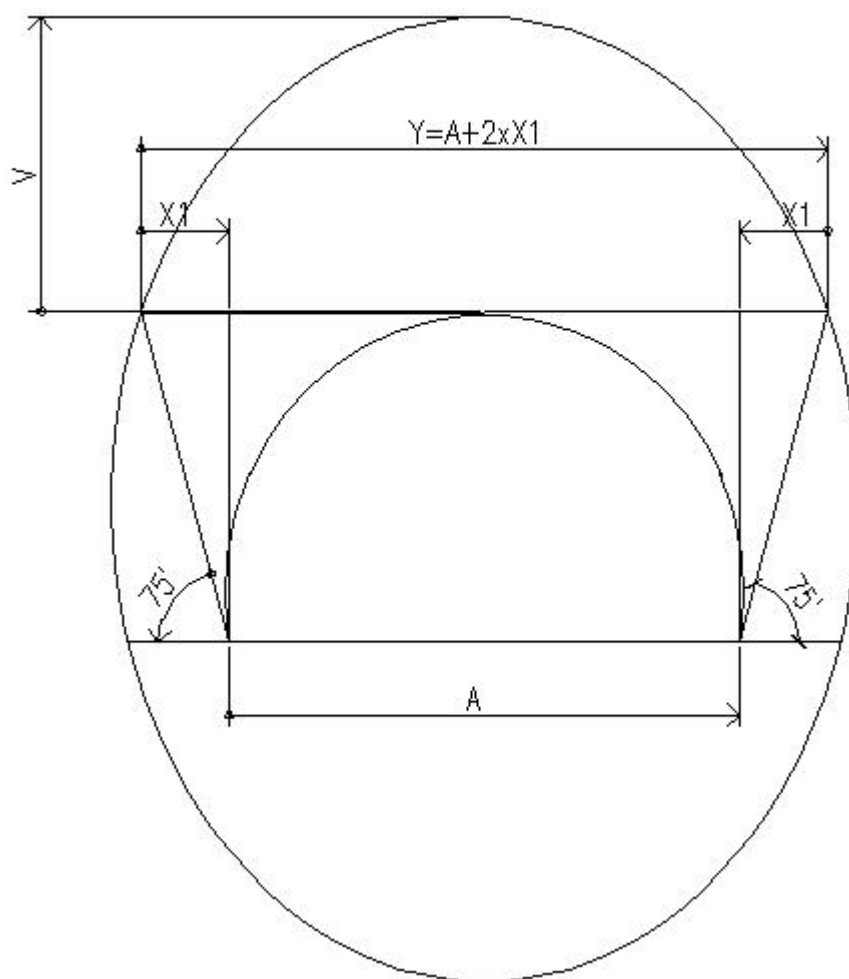
$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h}{X_1} \quad (6)$$

$$X_1 = \frac{3,6}{\operatorname{tg} 75^\circ} = 0,965 \text{ m} \cong 1 \text{ m}$$

β je úhel dle Protodjakonovy teorie $\beta = \frac{90^\circ + \varphi}{2} = 75^\circ$

h výška díla [m]

Oblouková výztuž 00-0-16



Obr. 25 Přirozená horninová klenba podle Protodjakonova pro obloukové dílo

Získali jsme výpočet zatížení na obloukovou výztuž od přirozené horninové klenby q_n . Parametry samotné klenby (výšku, šířku) již taky známe. V našem případě potřebujeme ještě vědět přetížení způsobené propojováním oblasti rozvolnění pod klenbou dlouhého důlního díla s oblastí zavalování nad stěnovým porubem. „Výpočet přetížení výztuže dlouhého důlního díla při průchodu porubu vychází z předpokladu, že dojde k propojení rozvolněné oblasti, která se tvoří pod horninovou klenbou nad dlouhým důlním dílem s oblastí závalu nad porubem.“ [2] Výška závalové oblasti (mocnost závalu) je závislá na mocnosti dobývané sloje a koeficientu nakypření.

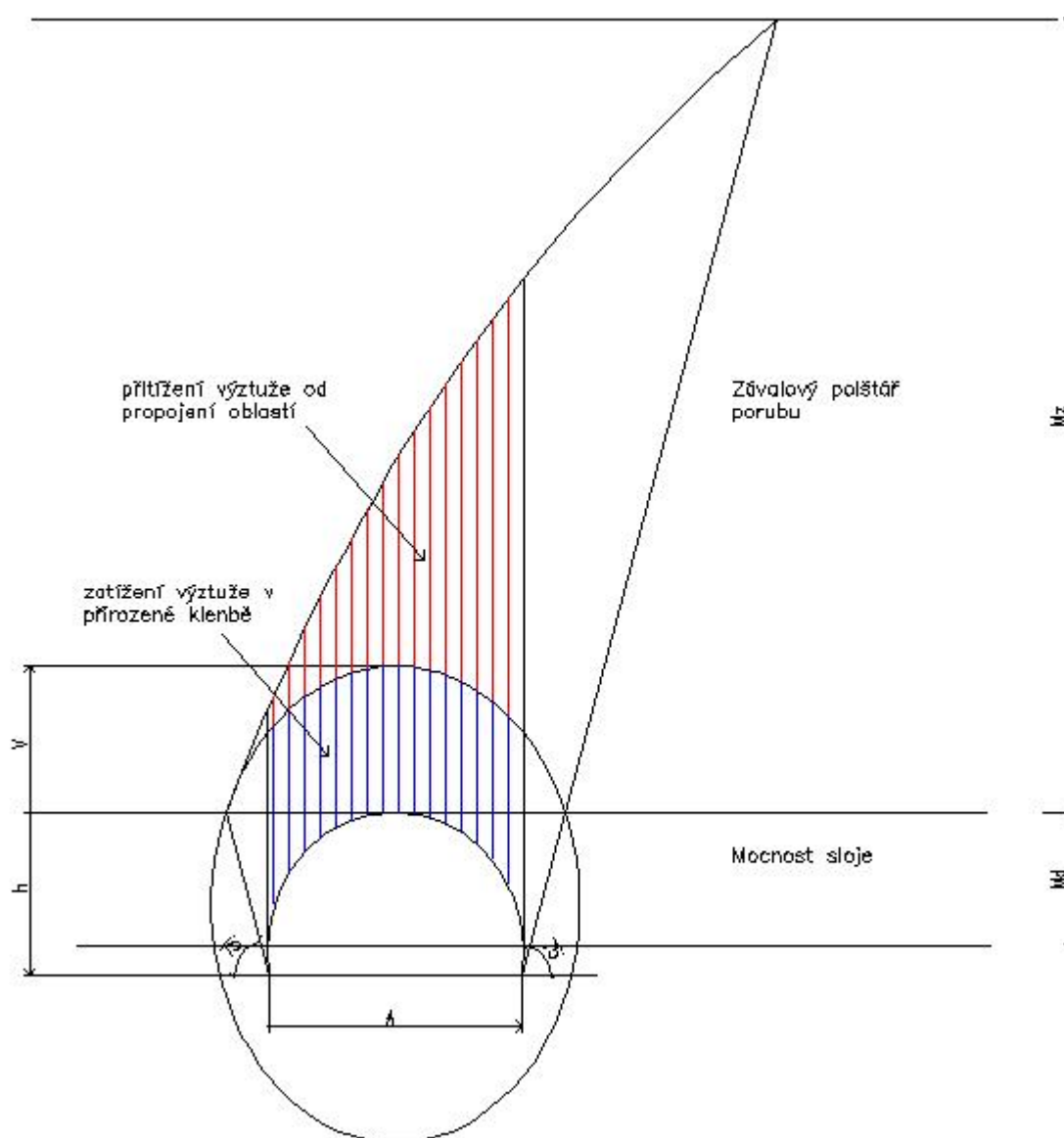
6. Výška závalové oblasti M_z

$$M_z = \frac{M_d}{k-1} \quad (7)$$

$$M_z = \frac{3}{1,17-1} = 17,65\text{m}$$

M_d dobývaná mocnost sloje, v našem případě $M_d = 3\text{m}$

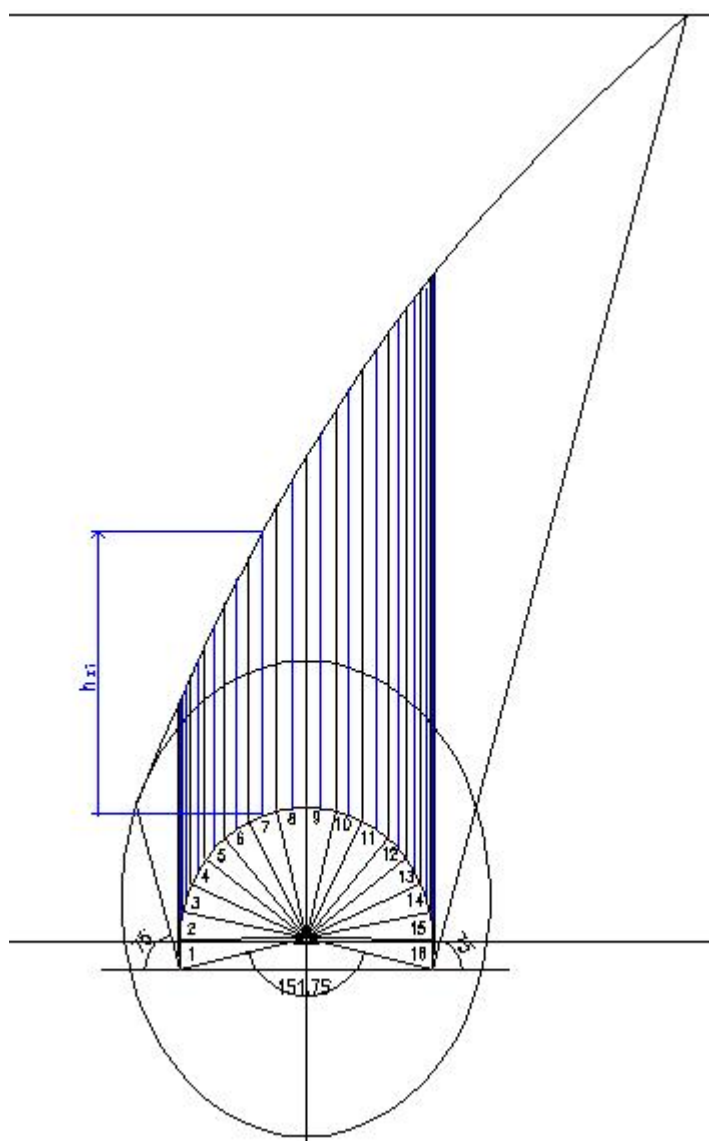
k koeficient nakypření nadložních hornin $k = 1,17$



Obr. 26 Přetížení způsobené propojováním oblastí

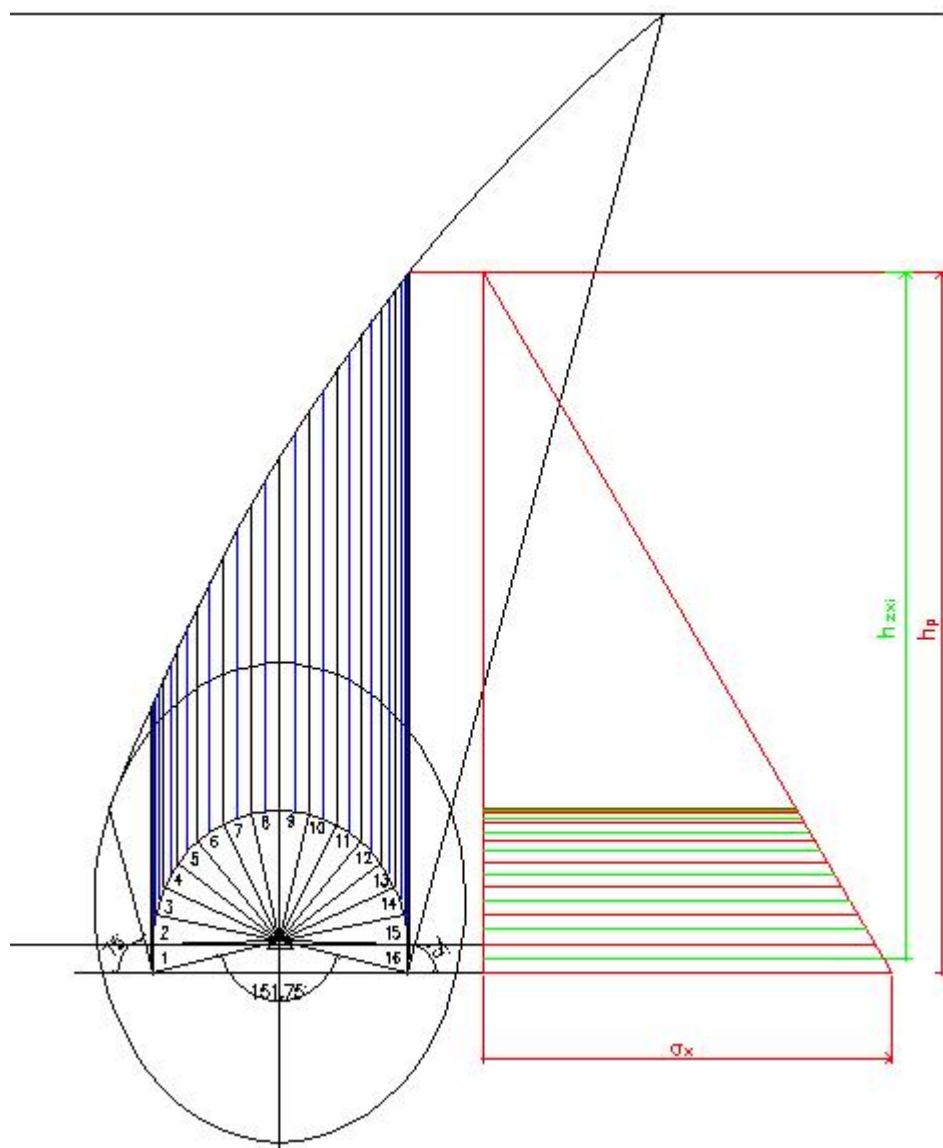
7. Rozdělení zatížení

Pro výpočet celkového zatížení (od přirozené klenby a propojení oblasti) musíme dané dílo rozdělit na několik částí. Rozdělení díla volíme radiálně na šestnáct částí (čím více, tím přesnější výpočet). Vzniklo šestnáct „proužků“ zatížení, které od levé části k pravé narůstají. První a poslední zatížení zanedbáváme, z důvodu velikosti a opačného působení na výztuž díla. Každým středem „proužku“ vedeme přímku (modrou) o proměnné výšce h_{zi} , kterou použijeme pro samotný výpočet vertikálního spojitého zatížení jednotlivých částí.



Obr. 27 Radiální rozdělení díla a vertikálních zatěžovacích „proužků“

Taktéž podle radiálního rozdělení díla počítáme horizontální zatížení. Podle známé výšky přetížení díla h_p spočítáme horizontální napětí σ_x . Horizontální napětí rozdělíme podle radiálního rozdělení díla. Od každého středu „proužku“ (zelené přímky) měříme proměnnou výšku h_{zxi} , kterou použijeme pro samotný výpočet horizontálního spojitého zatížení jednotlivých částí neboli horizontálního napětí.



Obr. 28 Radiální rozdělení díla a vertikálních, horizontálních zatěžovacích „proužků“

8. Výpočet vertikálního spojitého i – tého zatížení q_{zi}

$$q_{zi} = \gamma \times h_{zi} \quad (8)$$

γ objemová tíha horniny 25 kN/m³

h_{zi} proměnná výška „proužku“ vertikálního zatížení [m]

číslo proužku	h_z [m]	γ [kN/m ³]	q_z [kN/m]
1	zanedbáváme		
2	4,8921	25	122,3025
3	4,6669	25	116,6725
4	4,6613	25	116,5325
5	4,9446	25	123,615
6	5,512	25	137,8
7	6,3107	25	157,7675
8	7,2582	25	181,455
9	8,3519	25	208,7975
10	9,4824	25	237,06
11	10,619	25	265,475
12	11,7137	25	292,8425
13	12,7234	25	318,085
14	13,6392	25	340,98
15	14,3809	25	359,5225
16	zanedbáváme		

Tab. 1 Výpočet vertikálního spojitého i – tého zatížení q_{zi}

Proměnnou výšku proužků h_{zi} jsme odečetli pomocí programu AutoCAD 2010. Vypočtené hodnoty jednotlivých vertikálních spojitých zatížení i – tých „proužku“ (Tab.1).

9. Výpočet horizontálního spojitého i – tého zatížení q_{xi}

$$q_{xi} = \gamma \times h_{zxi} \times \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (9)$$

γ objemová tíha horniny 25 kN/m³

h_{zxi} proměnná výška horizontálního zatížení [m]

φ úhel vnitřního tření [°]

číslo proužku	h_{zx} [m]	φ [°]	γ [kN/m ³]	q_x [kN/m]
9	11,932	60	25	21,4170
10	12,0869	60	25	21,6950
11	12,3461	60	25	22,1603
12	12,7714	60	25	22,9236
13	13,3332	60	25	23,9320
14	13,9206	60	25	24,9864
15	14,5459	60	25	26,1087
16	15,1555	60	25	27,2029

Tab. 2 Výpočet horizontálního spojitého i – tého zatížení q_{xi}

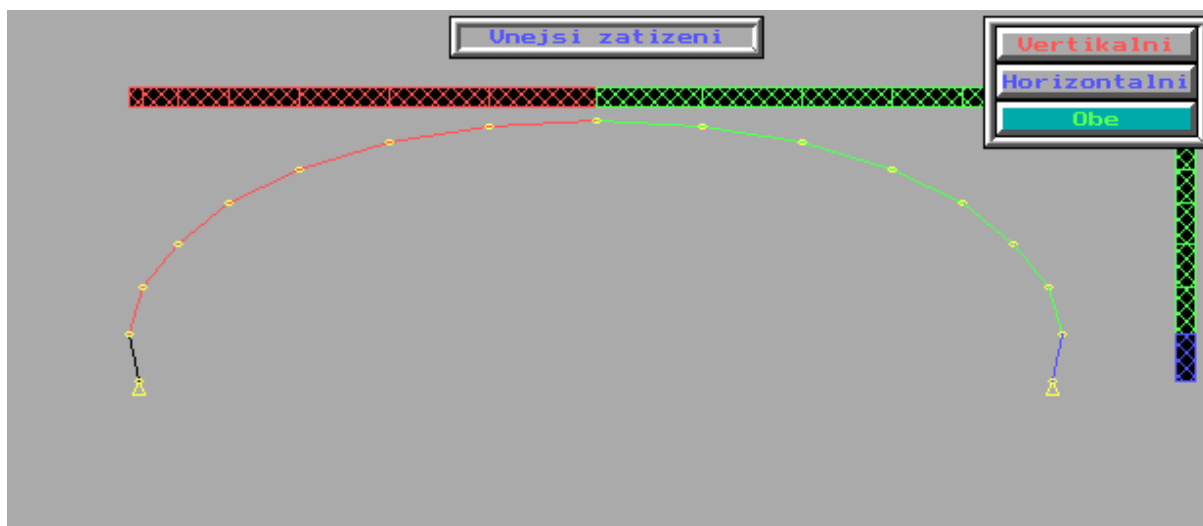
Horizontální spojité zatížení bude pouze na pravé straně díla (část díla 9 -16). Proměnnou výšku proužků h_{zxi} jsme odečetli pomocí programu AutoCAD 2010. Vypočtené hodnoty jednotlivých horizontálních spojitých zatížení i – tých „proužku“ (Tab.2).

10. Výpočet normálových sil, momentů a deformací

Pro výpočet normálových sil, momentů a deformací použijeme výpočetní software Revyz. Do programu Revyz zadáváme velikost důlního díla (OO-O-16) pomocí souřadnic x, y . Souřadnice odečteme v programu AutoCAD v jednotlivě radiálně rozdělených úsecích. Poté na jednotlivé úseky díla přiřadíme dané spojitě zatížení.

číslo proužku	Souřadnice uzlu X [m]	Souřadnice uzlu Y [m]	vertikální zatížení q_z [kN/m]	horizontální zatížení q_x [kN/m]
1 začátek	0,1	0,01	zanedbáváme	0
1 konec	0,05	0,663		
2 začátek	0,05	0,663	122,3025	0
2 konec	0,134	1,305		
3 začátek	0,134	1,305	116,6725	0
3 konec	0,343	1,914		
4 začátek	0,343	1,914	116,5325	0
4 konec	0,656	2,479		
5 začátek	0,656	2,479	123,615	0
5 konec	1,096	2,961		
6 začátek	1,096	2,961	137,8	0
6 konec	1,64	3,33		
7 začátek	1,64	3,33	157,7675	0
7 konec	2,26	3,556		
8 začátek	2,26	3,556	181,455	0
8 konec	2,916	3,64		
9 začátek	2,916	3,64	208,7975	21,417
9 konec	3,572	3,556		
10 začátek	3,572	3,556	237,06	21,695
10 konec	4,191	3,33		
11 začátek	4,191	3,33	265,475	22,1603
11 konec	4,735	2,961		
12 začátek	4,735	2,961	292,8425	22,9236
12 konec	5,175	2,479		
13 začátek	5,175	2,479	318,085	23,932
13 konec	5,488	1,914		
14 začátek	5,488	1,914	340,98	24,9864
14 konec	5,697	1,305		
15 začátek	5,697	1,305	359,5225	26,1087
15 konec	5,781	0,663		
16 začátek	5,781	0,663	zanedbáváme	27,2029
16 konec	5,731	0,01		

Tab. 3 Souřadnice uzlů díla OO-O-16 a k tomu příslušné „proužky“ se spojitým zatížením



Obr. 29 Schéma profilu díla OO-O-16 a zatížení jednotlivých částí

Pro výpočet normálových sil, momentů a deformací potřebujeme ještě parametry obloukové výztuže, lanové kotvy a součinitele pasivního odporu. Obloukovou výztuž budeme budovat á jednoho metru, proto bereme plnou únosnost obloukové výztuže.

Lanovou kotvu vložíme do programu pomocí síly v uzlu (uzel 11). Velikost této síly bude polovina únosnosti lanové kotvy, a to z toho důvodu, že lanové kotvy instalujeme co druhou obloukovou výztuž. Znamená to, že na dvě obloukové výztuže připadne jedna lanová kotva. Lanovou kotvu instalujeme v odklonu 10 stupňů od daného bodu, tedy provádíme rozklad na vertikální a horizontální sílu. Program nebere v potaz vrstevnatost a další parametry okolních hornin, a proto úhel volíme přibližně. Délku kotvy a ukotvení kořene ve výpočtu nezohledňujeme. Délku kotvy navrhujeme podle velikosti rozrušené oblasti.

Pasivní odpor bude aktivován pouze v místech zatlačení výztuže do horniny. Obrazce pasivních odporů při použití programu Revyz nevkládáme přímo, ale jsou funkcí zatížení a tuhosti systému hornina – výztuž a jsou stanoveny až na základě realizovaného iteračního výpočtu.

Parametry výztuže

Výztuž TH 29

Plocha výztuže $A_p = 37 \text{ cm}^2$

Šířka výztuže $b = 150,5 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti $I_x = 616 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$

Modul průřezu $W_x = 94 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Modul pružnosti $E = 210000 \text{ MPa}$

Mez kluzu $R_e = 350 \text{ MPa}$

Mez pevnosti $R_n = 550 \text{ MPa}$

Parametry lanové kotvy

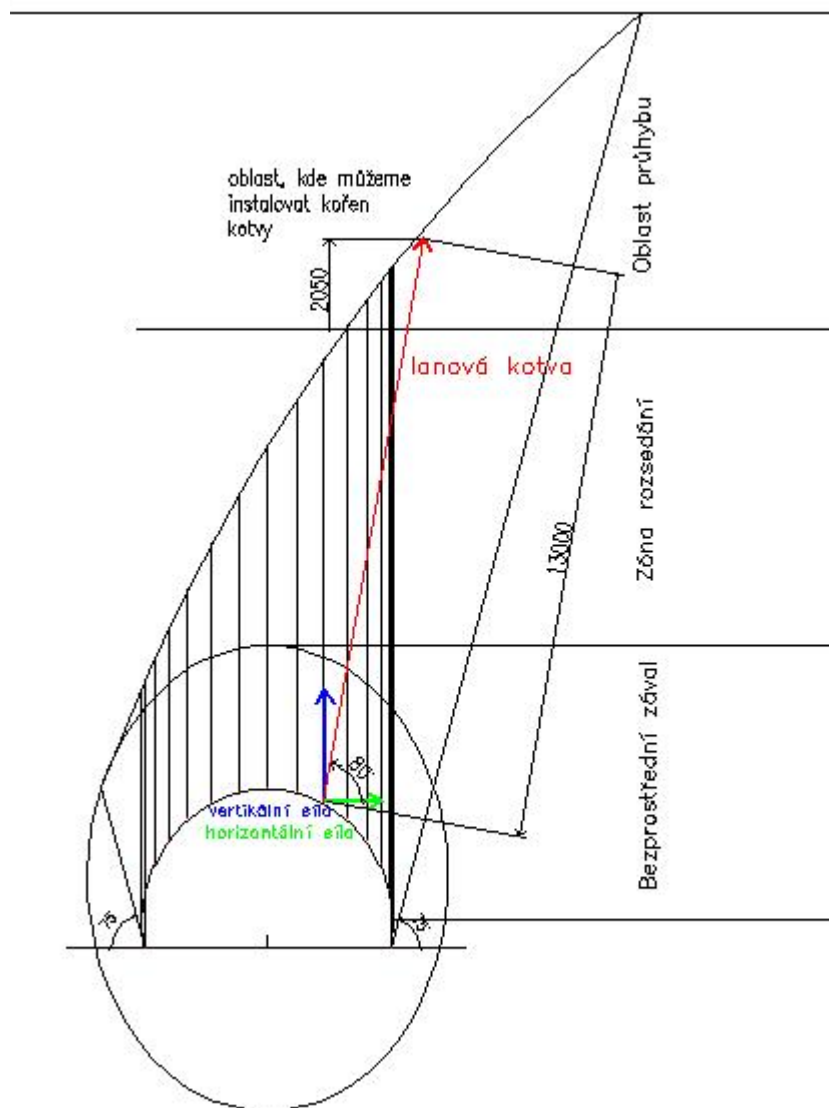
Kotva IR-4E/W

Únosnost na mezi pevnosti $R_{nk} = 420 \text{ kN}$

Počet strun 8

Průměr drátu $d = 7 \text{ mm}$

Průměr pramence $D = 27 \text{ mm}$



Obr. 30 Schéma rozkladu síly od lanové kotvy

Výpočet horizontální síly P_x

$$P_x = \cos 80^\circ \times \frac{R_n}{2} \quad (10)$$

$$P_x = \cos 80^\circ \times 210 = 36,5 \text{ kN}$$

R_n únosnost na mezi pevnosti [kN]

Výpočet vertikální síly P_z

$$P_z = \sin 80^\circ \times \frac{R_n}{2} \quad (11)$$

$$P_z = \sin 80^\circ \times 210 = 206,8 \text{ kN}$$

R_n únosnost na mezi pevnosti [kN]

Součinitel pasivního odporu k_p

$$k_p = \frac{E_b}{a \times (1 + \mu_b)} \quad (12)$$

$$k_{p1} = \frac{35000}{2,75 \times (1 + 0,3)} = 9790$$

$$k_{p2} = \frac{35000}{3,15 \times (1 + 0,3)} = 8547$$

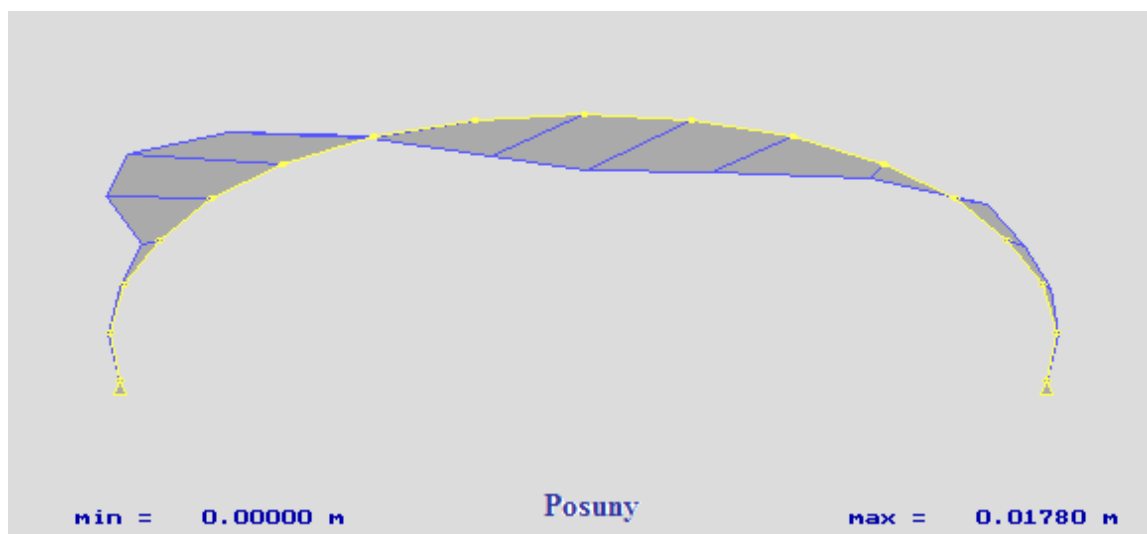
E_b modul pružnosti obklopující prostředí [MPa]

a poloměr výztužného oblouku $a_1 = 2,75$ $a_2 = 3,15$ [m]

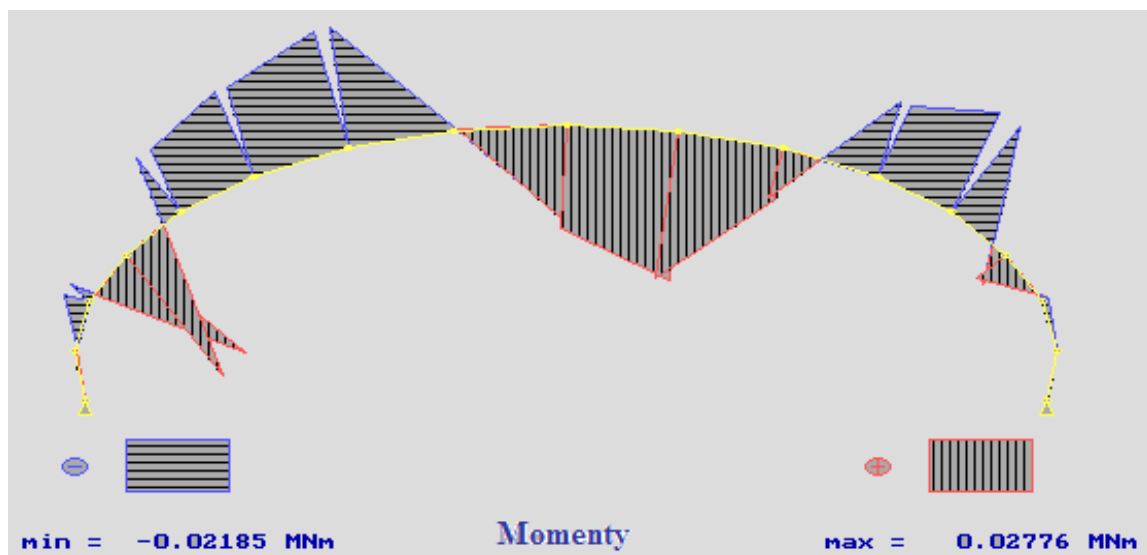
μ_b Poissonovo číslo obklopujícího prostředí $\mu_b = 0,3$

Veškeré parametry nutné pro výpočet v programu Revyz máme zadané. Součinitel pasivního odporu k_1 , k_2 volíme podle poloměru výztužného oblouku, proto dva koeficienty. Z důvodu lepšího srovnání budeme provádět dva výpočty, jeden pouze s obloukovou výztuží a druhý s obloukovou výztuží včetně kotvy.

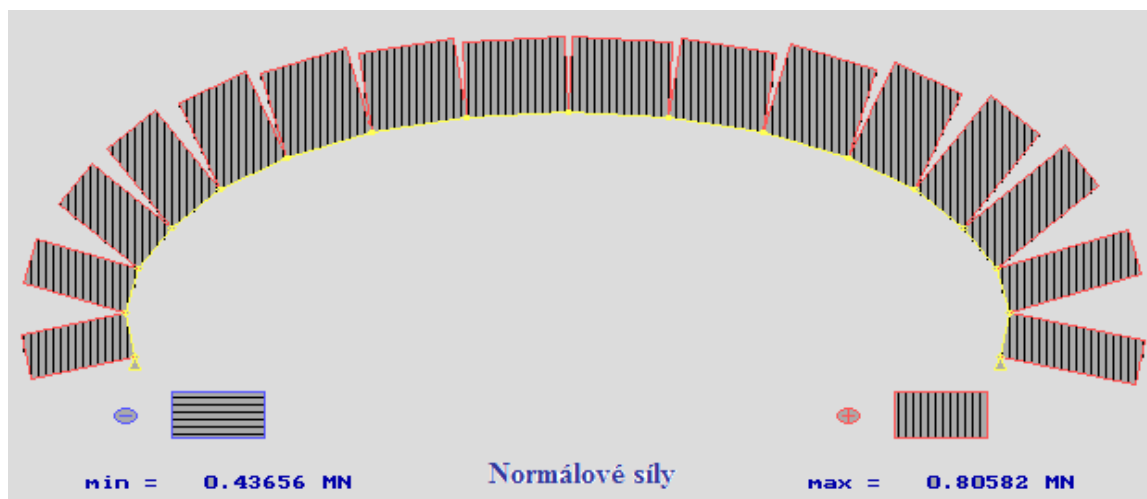
Oblouková výztuž bez lanové kotvy



Obr. 31 Oblouková výztuž bez lanové kotvy (posuny)

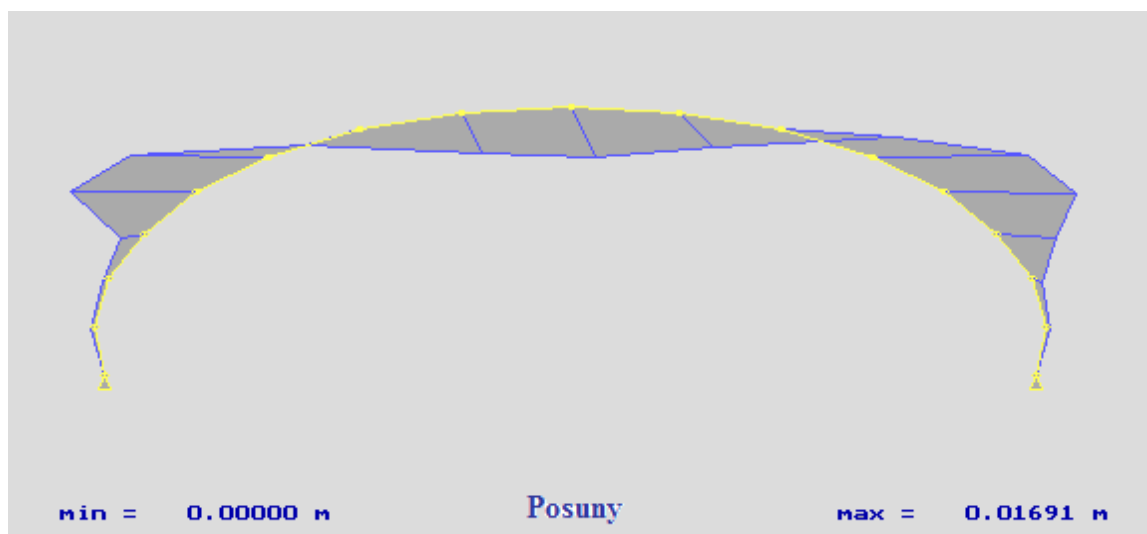


Obr. 32 Oblouková výztuž bez lanové kotvy (momenty)

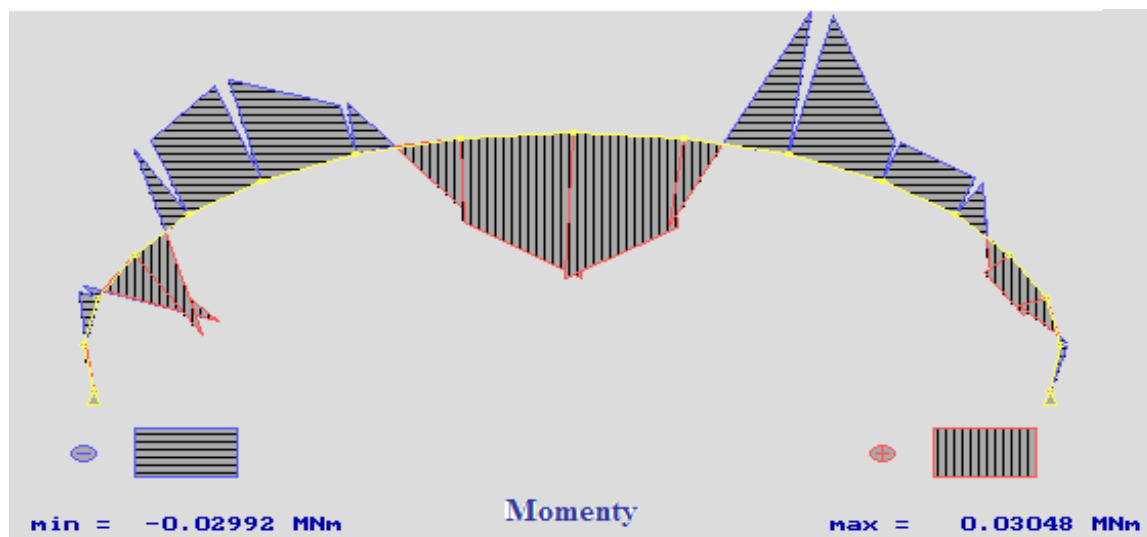


Obr. 33 Oblouková výztuž bez lanové kotvy (normálové síly)

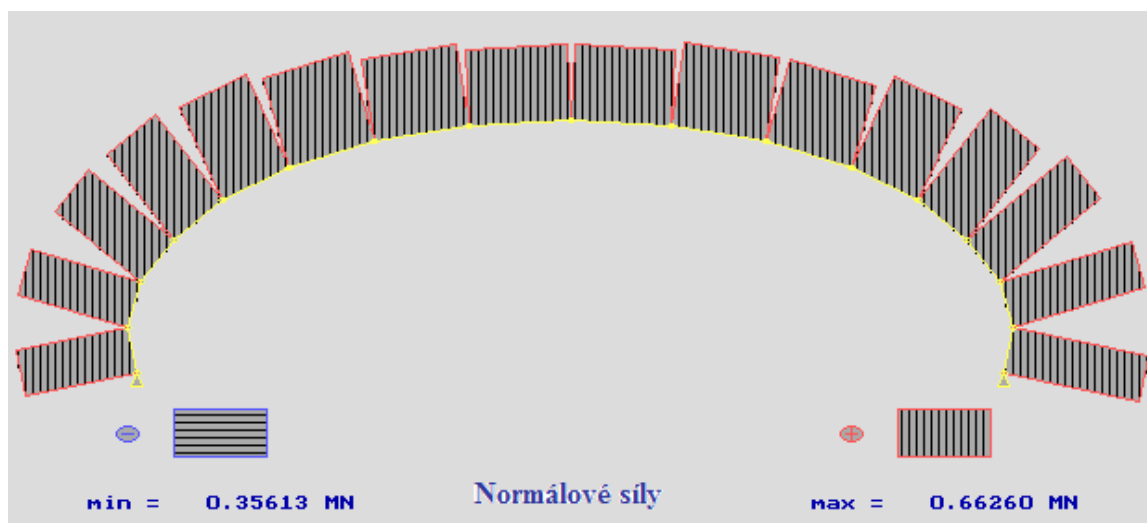
Oblouková výztuž s lanovou kotvou



Obr. 34 Oblouková výztuž s lanovou kotvou (posuny)



Obr. 35 Oblouková výztuž s lanovou kotvou (momenty)



Obr. 36 Oblouková výztuž s lanovou kotvou (normálové síly)

Napětí obloukové výztuže v i – tém prutu σ_i

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A} \pm \frac{M_i}{W} < R_e \quad (13)$$

N_i normálová síla v i - tém prutu [kN]

A_p plocha výztuže [m^2]

M_i moment v i - tém prutu [kNm]

W modul průřezu [m^3]

R_e mez kluzu [Pa]

$A_p(\text{m}^2)$	0,0037
$W (\text{m}^3)$	0,000094
$R_e (\text{kPa})$	3,50E+05

Tab. 4 Průřezové charakteristiky

číslo prutu	M (kNm)	N (kN)	$(N/A_p)+(M/W)$	$(N/A_p)-(M/W)$	$\sigma_i < R_e$	$\sigma_i < R_e$
1 zač.	-3,60E-12	610	1,65E+05	1,65E+05	vyhoví	vyhoví
1 konec	0,33	-610	-1,61E+05	-1,68E+05	vyhoví	vyhoví
2	0,33	610	1,68E+05	1,61E+05	vyhoví	vyhoví
2	-4,6	-610	-2,14E+05	-1,16E+05	vyhoví	vyhoví
3	-4,6	600	1,13E+05	2,11E+05	vyhoví	vyhoví
3	28	-600	1,36E+05	-4,60E+05	vyhoví	nevyhoví
4	28	590	4,57E+05	-1,38E+05	nevyhoví	vyhoví
4	-12	-590	-2,87E+05	-3,18E+04	vyhoví	vyhoví
5	-12	560	2,37E+04	2,79E+05	vyhoví	vyhoví
5	-17	-560	-3,32E+05	2,95E+04	vyhoví	vyhoví
6	-17	520	-4,03E+04	3,21E+05	vyhoví	vyhoví
6	-22	-520	-3,75E+05	9,35E+04	nevyhoví	vyhoví
7	-22	480	-1,04E+05	3,64E+05	vyhoví	nevyhoví
7	-0,58	-480	-1,36E+05	-1,24E+05	vyhoví	vyhoví
8	-0,58	440	1,13E+05	1,25E+05	vyhoví	vyhoví
8	18	-440	7,26E+04	-3,10E+05	vyhoví	vyhoví
9	18	440	3,10E+05	-7,26E+04	vyhoví	vyhoví
9	27	-440	1,68E+05	-4,06E+05	vyhoví	nevyhoví
10	27	470	4,14E+05	-1,60E+05	nevyhoví	vyhoví
10	9,3	-470	-2,81E+04	-2,26E+05	vyhoví	vyhoví
11	9,3	540	2,45E+05	4,70E+04	vyhoví	vyhoví
11	-14	-540	-2,95E+05	2,99E+03	vyhoví	vyhoví
12	-14	630	2,13E+04	3,19E+05	vyhoví	vyhoví
12	-20	-630	-3,83E+05	4,25E+04	nevyhoví	vyhoví
13	-20	700	-2,36E+04	4,02E+05	vyhoví	nevyhoví
13	6,8	-700	-1,17E+05	-2,62E+05	vyhoví	vyhoví
14	6,8	760	2,78E+05	1,33E+05	vyhoví	vyhoví
14	-0,96	-760	-2,16E+05	-1,95E+05	vyhoví	vyhoví
15	-0,96	800	2,06E+05	2,26E+05	vyhoví	vyhoví
15	-0,1	-800	-2,17E+05	-2,15E+05	vyhoví	vyhoví
16	-0,1	810	2,18E+05	2,20E+05	vyhoví	vyhoví
16	0,00E+00	-810	-2,19E+05	-2,19E+05	vyhoví	vyhoví

Tab. 5 Posouzení napětí a meze kluzu obloukové výztuže bez lanové kotvy

číslo prutu	M (Nm)	N (N)	$(N/A_p)+(M/W)$	$(N/A_p)-(M/W)$	$\sigma_i < R_e$	$\sigma_i < R_e$
1 zač.	-7,10E-12	530	1,43E+05	1,43E+05	vyhoví	vyhoví
1 konec	0,22	-530	-1,41E+05	-1,46E+05	vyhoví	vyhoví
2	0,22	530	1,46E+05	1,41E+05	vyhoví	vyhoví
2	-3,5	-530	-1,80E+05	-1,06E+05	vyhoví	vyhoví
3	-3,5	520	1,03E+05	1,78E+05	vyhoví	vyhoví
3	22	-520	9,35E+04	-3,75E+05	vyhoví	nevyhoví
4	22	510	3,72E+05	-9,62E+04	nevyhoví	vyhoví
4	-17	-510	-3,19E+05	4,30E+04	vyhoví	vyhoví
5	-17	480	-5,11E+04	3,11E+05	vyhoví	vyhoví
5	-22	-480	-3,64E+05	1,04E+05	nevyhoví	vyhoví
6	-22	440	-1,15E+05	3,53E+05	vyhoví	nevyhoví
6	-10	-440	-2,25E+05	-1,25E+04	vyhoví	vyhoví
7	-10	390	-9,78E+02	2,12E+05	vyhoví	vyhoví
7	17	-390	7,54E+04	-2,86E+05	vyhoví	vyhoví
8	17	360	2,78E+05	-8,36E+04	vyhoví	vyhoví
8	30	-360	2,22E+05	-4,16E+05	vyhoví	nevyhoví
9	30	360	4,16E+05	-2,22E+05	nevyhoví	vyhoví
9	19	-360	1,05E+05	-2,99E+05	vyhoví	vyhoví
10	19	400	3,10E+05	-9,40E+04	vyhoví	vyhoví
10	-30	-400	-4,27E+05	2,11E+05	nevyhoví	vyhoví
11	-30	390	-2,14E+05	4,25E+05	vyhoví	nevyhoví
11	-9	-390	-2,01E+05	-9,66E+03	vyhoví	vyhoví
12	-9	470	3,13E+04	2,23E+05	vyhoví	vyhoví
12	-8,3	-470	-2,15E+05	-3,87E+04	vyhoví	vyhoví
13	-8,3	550	6,04E+04	2,37E+05	vyhoví	vyhoví
13	6	-550	-8,48E+04	-2,12E+05	vyhoví	vyhoví
14	6	620	2,31E+05	1,04E+05	vyhoví	vyhoví
14	5,7	-620	-1,07E+05	-2,28E+05	vyhoví	vyhoví
15	5,7	650	2,36E+05	1,15E+05	vyhoví	vyhoví
15	-1,3	-650	-1,90E+05	-1,62E+05	vyhoví	vyhoví
16	-1,3	660	1,65E+05	1,92E+05	vyhoví	vyhoví
16	3,60E-12	-660	-1,78E+05	-1,78E+05	vyhoví	vyhoví

Tab. 6 Posouzení napětí a meze kluzu obloukové výztuže s lanovou kotvou

11. Vyhodnocení výsledku

Výsledkem návrhu a posouzení důlního díla profilu OO-O-16, výztuže TH 29 a lanové kotvy IR-4E/W je, že dosáhneme a překročíme mez kluzu, a tím je vytvořen řetězec s plastickými klouby. V tomto případě se zvyšuje deformace. Je nutno, ale říct, že pevnost výztuže nebude překročena. Mez pevnosti výztuže TH 29 je ($R_n=550$ MPa), přitom největší napětí ve výztuži bude 460 MPa. Z toho důvodu můžeme náš návrh výztuže a kotvy pro navržené podmínky považovat za vyhovující. Z dosažených výsledků také vyplývá, že vliv vysokého kotvení na deformaci a samotnou únosnost výztuže není velký. Maximální deformace obloukové výztuže bez kotvy dosahuje hodnoty 1,8 cm. Naproti tomu deformace obloukové výztuže s kotvou dosahuje hodnoty 1,7 cm. Z porovnávaných deformací tedy zjišťujeme, že zatížení od přirozené klenby a přetížení od propojení oblastí je tak velké, kdy samotná lanová kotva nemá valný vliv na deformaci a napětí ve výztuži. Délku kotvy volíme, jak již bylo několikrát řečeno, dle velikosti rozrušené oblasti. V našem případě dosahujeme délky kotvy 13 m (viz Obr. 30). Naším cílem je dostat se do zóny průhybu, kdy je pevnost porušená, ale není to už zóna závalu a můžeme zde instalovat kořen kotvy.

Je třeba uvědomit si, že jsme ve výpočtu nezahrnuli veškeré parametry okolního horninového masivu. Počítali jsme sice s redukovanou pevností okolních hornin, s pasivním odporem, koeficientem nakypření, pevnosti v tahu nadložních hornin, ale nebrali jsme v potaz úklon vrstev, vrstevnatost atd. Další vliv, který může mít nedílnou součást na zvýšení únosnosti výztuže je bubření počvy a zatlačování výztuže směrem do horninového masivu. Taktéž samotnou kotvu, podložku, matku a kořen kotvy neposuzujeme a nebereme v úvahu jejich vliv na únosnost kombinované výztuže.

6. Závěr

Podstatou bakalářské práce bylo přiblížení metody vysokého kotvení v hornictví. Tento způsob kotvení je u nás poměrně moderní, i z tohoto hlediska dostupnost informací nebyla snadná. Ze získaných materiálů a informací jsem se snažil vytvořit ucelený soupis zásad ohledně vysokého kotvení.

V jednotlivých bodech popisuji základní princip chování svorníků v horninovém masivu. Přes základní vysvětlení funkce svorníků se dostávám k vysokému kotvení a jeho využití. Snažím se, přiblížit stávající situaci a trendy vysokého kotvení v OKR. Řeším správný návrh a zásady, které by měly být dodrženy. Součástí práce je také hlavní účel vysokého kotvení, a to v chodbách dvojího využití. Toto využití je detailně popsáno, i funkce samotných dlouhých kotev v kombinované výztuži. Kromě možnosti využití dlouhých kotev s obloukovou výztuží se zabývám spolupůsobením krátkých tyčových svorníků a dlouhých lanových kotev.

Posledním cílem práce byl samotný návrh lanových kotev a obloukové výztuže. Výpočet normového zatížení jsem prováděl podle OKD směrnic. Parametry okolních hornin byly navrženy pro zdejší podmínky dolů v hloubce 800. metrů. Obloukovou výztuž a lanovou kotvu jsem volil podle získaných informací a předpokládaného zatížení. Samotný výpočet momentů, normálových sil a deformací jsem provedl pomocí softwaru Revyz. Podle vypočtených výsledků jsem porovnal napětí ve výztuži s mezi kluzu a zjistil, že výztuž tuto mez na několika prutech překročí. Mez pevnosti ovšem překročená nebyla. Nakonec bych chtěl jen říct, že jak výpočet, tak veškeré zde řečené zásady jsou odlišné podle různých geologických podmínek, technologických možností a mnoha dalších aspektů, které musíme brát v úvahu.

7. Seznam použitých zdrojů

[1] spol. Rock Mechanics Technology. *Příručka firmy MINOVA - Horninové svorníky kotvené pryskyřicí*. Chipping Norton, 2006

[2] ŠŇUPÁREK, Richard. *Metodický návod pro navrhování a používání vysokého kotvení pro stabilizaci důlních děl v podmínkách OKR*. Ostrava, 2010

[3] ALDORF, Josef. *Mechanika podzemních konstrukcí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1999, 410 s. ISBN 80-707-8695-7.

[4] ŠŇUPÁREK, Richard. SOUČASNÉ VÝHLEDY A TENDENCE V OBLASTI METOD ZAJIŠŤOVÁNÍ PORUBNÍCH CHODEB V UHELNÝCH DOLECH. In:
[online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z:
<http://fast10.vsb.cz/science/seminar2009/pics/11.pdf>

[5] NASTULCZYK, Česlava. Svorníkování se vrací do dolů OKD. *HORNÍK* [online]. 2010, roč. 40, č. 8 [cit. 2012-04-24]. Dostupné z:
http://www.okd.cz/dokums_casopis/hornik_0810_web_opr_3370_3431.pdf

[6] POLUS, Marian. *Obudowa podporowo – kotwiowa jako sposób utrzymania gabarytów wyrobisk chodnikowych w trudnych warunkach górniczo - geologicznych*. Zabrze, 2010

[7] Aplikace pro hornictví. *Minova Bohemia* [online]. [cit. 2012-04-24]. Dostupné z:
<http://www.minova.cz/aplikace/hornictvi/>

8. Seznam obrázku

Obrázek 1: Ocelová oblouková výztuž; Zdroj [http://www.konstrukce.cz]	4
Obrázek 2: Kotva typu; Zdroj [7]	4
Obrázek 3: Napětí kolem podzemních děl obdélníkového a kruhového průřezu; Zdroj [1]	4
Obrázek 4: Porušení smykem obdélníkových a kruhových profilů díla; Zdroj [1]	5
Obrázek 5: Zavěšení bloků rozrušené vrstvy o výše položenou únosnou vrstvu; Zdroj [1]	6
Obrázek 6: Přímé omezení smykového zatížení; Zdroj [1]	7
Obrázek 7: Omezení osového zatížení; Zdroj [1]	8
Obrázek 8: Udržení napětí ve stropu díla; Zdroj [1]	9
Obrázek 9: Svěrné zatížení je menší než hmotnost horniny, může dojít k pádu stropu; Zdroj [1]	10
Obrázek 10: Výztuž slabého stropu v podmínkách vysokého napětí; Zdroj [1]	10
Obrázek 11: Schéma klenbové teorie dle Protodjakonova pro kruhové dílo; Zdroj [6]	13
Obrázek 12: Schéma rozkladu sil v počvě díla a možnost bubření samotné počvy; Zdroj [6]	14
Obrázek 13: Schéma podepření výztužných oblouku s rovinnými podvlaky; Zdroj [2]	15
Obrázek 14: Rovinné podvlaky přes obloukovou výztuž uchyceny pomocí kotev; Zdroj [6]	15
Obrázek 15: Ukázka správné varianty (šachovnicového) rozložení podvlaků; Zdroj [6]	16
Obrázek 16: Uchycení kotvy s podvlakem v ose díla; Zdroj [6]	17
Obrázek 17: Ochranný pilíř mezi porubními chodby běžného typu; Zdroj [Autor]	18
Obrázek 18: Vyztužení porubní chodby; Zdroj [6]	20
Obrázek 19: Příklad kombinace obloukové výztuže a vysokého kotvení; Zdroj [6]	21
Obrázek 20: Schéma zpevněného nosníku pomocí krátkých svorníků; Zdroj [Autor]	22

Obrázek 21: Schéma zpevněného nosníku pomoci krátkých svorníků a „zavěšení“ pomoci lanových do vyššího nadloží; Zdroj [Autor]	23
Obrázek 22: Pramencová kotva typu FLEXIBOLT; Zdroj [7]	24
Obrázek 23: Ampule s pryskyřicí Lokset; Zdroj [1]	25
Obrázek 24: Otáčení ampule ve vrtu; Zdroj [1]	25
Obrázek 25: Přirozená horninová klenba podle Protodjakonova pro obloukové dílo; Zdroj [Autor, AutoCAD2010]	29
Obrázek 26: Přetížení způsobené propojováním oblasti; Zdroj [Autor, AutoCAD2010]	30
Obrázek 27: Radiální rozdělení díla a vertikálních zatěžovacích „proužku“; Zdroj [Autor, AutoCAD2010]	31
Obrázek 28: Radiální rozdělení díla a vertikálních, horizontálních zatěžovacích „proužku“; Zdroj [Autor, AutoCAD2010]	32
Obrázek 29: Schéma profilu díla OO-O-16 a zatížení jednotlivých částí; Zdroj [Autor, Revyz]	36
Obrázek 30: Schéma rozkladu síly od lanové kotvy; Zdroj [Autor, AutoCAD2010]	38
Obrázek 31: Oblouková výztuž bez lanové kotvy (posuny); Zdroj [Autor, Revyz]	40
Obrázek 32: Oblouková výztuž bez lanové kotvy (momenty); Zdroj [Autor, Revyz]	40
Obrázek 33: Oblouková výztuž bez lanové kotvy (normálové síly); Zdroj [Autor, Revyz]	40
Obrázek 34: Oblouková výztuž s lanovou kotvou (posuny); Zdroj [Autor, Revyz]	41
Obrázek 35: Oblouková výztuž s lanovou kotvou (momenty); Zdroj [Autor, Revyz]	41
Obrázek 36: Oblouková výztuž s lanovou kotvou (normálové síly); Zdroj [Autor, Revyz]	41

9. Seznam tabulek

Tabulka 1: Výpočet vertikálního spojitého i – tého zatížení q_{zi} ; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	33
Tabulka 2: Výpočet horizontálního spojitého i – tého zatížení q_{xi} ; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	34
Tabulka 3: Souřadnice uzlů díla OO-O-16 a k tomu příslušné „proužky“ se spojitým zatížením; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	35
Tabulka 4: Průřezové charakteristiky; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	42
Tabulka 5: Posouzení napětí a meze kluzu obloukové výztuže bez lanové kotvy; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	43
Tabulka 6: Posouzení napětí a meze kluzu obloukové výztuže s lanovou kotvou; Zdroj [Autor, EXCEL 2007]	44